

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
Materiais – PPGE3M

**Estudo Comparativo do Desgaste Erosivo do Tipo Lama, do Aço Inox
Martensítico AISI 410 com os Revestimentos Carbetos de Tungstênio
86WC-10Co4Cr, obtido por HVOF e o Elastômero PUR Comercial**

FREDDY GALILEO SANTACRUZ BASTIDAS

Engenheiro de Materiais

Dissertação para obtenção de título de

Mestre em Engenharia

Porto Alegre - RS

2018

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
Materiais – PPGE3M

**Estudo Comparativo do Desgaste Erosivo do Tipo Lama, do Aço Inox
Martensítico AISI 410 com os Revestimentos Carbetos de Tungstênio
86WC-10Co4Cr, obtido por HVOF e o Elastômero PUR Comercial**

FREDDY GALILEO SANTACRUZ BASTIDAS

Engenheiro de Materiais

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Porto Alegre – RS

2018

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção de título de Mestre em Engenharia, na área de Ciência e Tecnologia dos Materiais e aprovada em sua forma final pelo orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGE3M) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Co- Orientador: Prof. Dr. Antonio Takimi

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Felipe Berutti

Prof. Dr. Eduardo Luis Schneider

Prof. Dr. Janio Venturini

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Coordenador do PPGE3M

Agosto de 2018.

Dedico este triunfo a las personas que más han confiado en mí.

A mi madre y a mi abuela por su ejemplo de perseverancia, y estar presentes en cada uno de mis propósitos, acompañándome con su espíritu luchador y de grandeza, a mi padre, por incentivarme a un respeto profundo y dedicación por la ciencia.

A mi familia entera por estar siempre presentes y confiar en mis aptitudes, han estado con su firme apoyo a lo largo de este camino el cual un día decidí y que transformo mi vida para siempre; aventura que espero jamás abandonar, porque el camino de la ciencia es el poder de las futuras generaciones.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não poderia ser concluído sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto minha sincera homenagem:

Ao meu orientador Prof.Dr. Carlos Pérez Bergmann, pela grandiosa oportunidade de fazer parte do Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), pelo grande apoio durante todo o tempo aqui no Brasil, pela excelente amizade, orientação, disposição e pela confiança depositada nesses anos de mestrado, que enriqueceu enormemente meu crescimento pessoal e profissional.

Ao meu Co-Orientador Prof. Dr. Antonio Takimi, pela excelente orientação, paciência e por compartilhar toda sua sabedoria e seus ensinamentos ao longo desse período de mestrado, por toda confiança e oportunidade depositadas.

A todos os professores, amigos e colegas, do Laboratório de Materiais Cerâmicos da Escola de Engenharia da UFRGS (LACER), pela excelente amizade, pelo apoio, prático e teórico, e aprendizado. Por todo acolhimento nestes anos de mestrado.

Ao Gabriel Cogo do Centro de Pesquisa e Tecnologia da indústria Rijeza Metalurgia, pelo fornecimento dos revestimentos poliméricos e chapas metálicas da pesquisa.

Ao Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) em especial ao Prof. Dr. Afonso Reguly, pela colaboração nos cortes das chapas dos materiais metálicos como também na preparação das amostras; e ao Prof. Dr. Francisco Jose Kiss, pelo auxílio, disposição e ensinamentos durante a caracterização dos revestimentos e interpretação dos resultados na análise microestrutural, através da microscopia eletrônica de varredura (MEV) com microsonda Acoplada (EDS).

Ao Prof. Dr. Fabio Pinto da Silva do Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LdSM) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), pelo auxílio, disposição e ensinamentos na digitalização tridimensional dos materiais submetidos ao ensaio de erosão por lama, e na obtenção da profundidade desgastada pelo erodente com o programa Geomagic Studio.

Aos funcionários do Laboratório de Usinagem Convencional (LUC) da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), pelo auxílio na confecção do equipamento de erosão por lama.

Ao engenheiro Rubem Almeida pelo auxílio na confecção do acessório e dispositivo Venturi-acelerador de partículas, usado na pistola do equipamento de desgaste erosivo tipo lama.

A minha família, minha namorada Cindy Lasso e meus amigos pelo apoio constante em todo momento.

"A ciência é a alma da prosperidade das nações e a fonte de vida do progresso"
(Louis Pasteur)

SUMÁRIO

	AGRADECIMENTOS	III
	SUMÁRIO	VII
	LISTA DE ILUSTRAÇÕES	XI
	LISTA DE TABELAS	XV
	LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	XVII
	LISTA DE SIMBOLOS	XIX
	RESUMO	XXI
	ABSTRACT	XXIII
1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	4
2.1	OBJETIVO GERAL	4
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
3	LIMITAÇÕES DO TRABALHO DE PESQUISA	6
4	REVISÃO DA LITERATURA	7
4.1	Aços Inoxidáveis Martensíticos AISI 410	7
4.2	Revestimentos Poliméricos PUR	9
4.2.1	Polímeros Elastoméricos	11
4.2.2	Propriedades dos Revestimentos Poliméricos PUR	12
4.3	Revestimentos <i>CERMET</i> Carbeto de Tungstênio (86WC-10Co4Cr)	13
4.3.1	CARBETOS CIMENTADOS (<i>CERMET</i>)	13
4.3.2	Revestimentos Obtidos por Aspersão Térmica	14
4.3.2.1	Aspersão Térmica HVOF - High Velocity Oxy-Fuel	18
4.4	Erosão em Revestimentos <i>CERMET</i>	19
4.4.1	DESGASTE	21
4.4.2	Erosão	22
4.4.3	Erosão por Lama	24
4.4.4	Principais Fatores Responsáveis pelo Processo de Erosão por Lama	25
4.4.5	MECANISMOS DE EROÇÃO	26

5	MATERIAIS E MÉTODOS	28
5.1	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	29
5.2	MÉTODOS	32
5.2.1	Fabricação e Preparação Metalográfica dos Corpos de Prova	32
5.2.2	Caracterização dos Corpos de Prova	34
5.2.2.1	Análise Qualitativa de Fases por Difração de Raios-X (DRX)	34
5.2.2.2	Análise Térmica - Determinação da Perda ao Fogo (LOI)	35
5.2.2.3	Análise Microestrutural - Microscopia Óptica (M.O) - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com Microsonda Acoplada (EDS)	35
5.2.2.4	Espessura	35
5.2.2.5	Porosidade Total	36
5.2.2.6	Rugosidade Superficial	36
5.2.2.7	Microdureza	37
5.2.3	Desgaste Erosivo por Lama	37
5.2.4	Determinação da Área Erodida	41
5.2.5	Determinação da Profundidade Erodida	41
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
6.1	CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	42
6.1.0.1	Análise Qualitativa de Fases por Difração de Raios-X (DRX)	42
6.1.0.2	Análise Térmica - Determinação da Perda ao Fogo (LOI)	42
6.1.0.3	Análise Microestrutural - Microscopia Óptica (M.O) - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com Microsonda Acoplada (EDS)	43
6.1.0.4	Espessura	46
6.1.0.5	Porosidade Total	48
6.1.0.6	Rugosidade Superficial	49
6.1.0.7	Microdureza	49
6.2	Desgaste Erosivo por Lama	51
7	CONCLUSÕES	59
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	60
	REFERÊNCIAS	61
	APÊNDICE A – DESIGN DO PROTÓTIPO DO EQUIPAMENTO USADO DURANTE O ENSAIO DE DESGASTE EROSIVO POR LAMA	69

APÊNDICE B – DESIGN DAS PEÇAS DO ACESSÓRIO ADAPTADO NO BICO DA PISTOLA, COM O DISPOSITIVO VENTURI- ACELERADOR DE PARTÍCULAS, USADO DURANTE O ENSAIO DE DESGASTE EROSIVO POR LAMA	70
APÊNDICE C – TAXA EROSÃO VOLUMÉTRICA, EM FUNÇÃO ÂN- GULO DE ATAQUE, DO AÇO INOX MARTENSÍ- TICO AISI 410, CARBETO DE TUNGSTÊNIO WOKA 3653 (86WC-10CO4CR) E ELASTÔMERO PUR ME- TALINE 785	72

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Número de artigos científicos publicados na base de dados do <i>Science Direct</i> de "Slurry Erosion" e utilizando os termos "Slurry Erosion of Stainless Steel", "Slurry Erosion of Polymers" e "Slurry Erosion of Tungsten Carbide" (< http://www.sciencedirect.com/ >, disponível em 09-08-2018)	3
Figura 4.1 – a) O aço inoxidável forma uma camada de óxido de cromo. b) Quando riscado, esta película protetora é removida. c) A camada protetora é restaurada.	7
Figura 4.2 – Estrutura dos polímeros cristalinos.	11
Figura 4.3 – Representação de polímero amorfo.	12
Figura 4.4 – Microestrutura típica de revestimentos aspergidos termicamente (adaptado de FLAME SPRAY TECHNOLOGIES, 2016)	15
Figura 4.5 – Tipos de processos de aspersão térmica.	17
Figura 4.6 – Representação esquemática do processo de aspersão térmica por HVOF (adaptado de OERLIKON METCO).	18
Figura 4.7 – Equipamento de aspersão térmica similar ao empregado nos revestimentos em funcionamento (adaptado de FLAME SPRAY TECHNOLOGIES, 2016).	18
Figura 4.8 – Resistência ao desgaste de materiais e revestimentos (KULU; HUSAINOVA; VEINTHAL, 2005).	20
Figura 4.9 – Taxa de desgaste erosivo em função do ângulo de ataque (colisão) das partículas para materiais dúcteis e frágeis (adaptado de (INGOLE et al., 2013)).	24
Figura 4.10 – Esquema de erosão por lama (adaptado de (BUSZKO; KRELLA, 2017)).	26
Figura 4.11 – O efeito do ângulo de impacto no modo de remoção de material (adaptado de (BESTER, 1993)).	27
Figura 5.1 – Fluxograma da metodologia utilizada para a realização deste trabalho.	28
Figura 5.2 – Distribuição granulométrica por difração a laser da alumina eletrofundida. O tamanho médio de grão é de 98,55 μm	31
Figura 5.3 – Morfologia da alumina eletrofundida marrom utilizada como erodente. Aumento de 56x	31
Figura 5.4 – Corpos-de-prova de aço inoxidável AISI 410 na forma de cilindro com 30 mm de diâmetro e 10 mm de altura.	32
Figura 5.5 – Corpos-de-prova do revestimento 86WC-10Co4Cr (Woka 3653) aspergido termicamente na forma de cilindro com 30 mm de diâmetro e 10 mm de altura.	33

Figura 5.6 – Corpos-de-prova com aplicação do primer impermeabilizante Meta-Line 924 (coloração vermelha).	33
Figura 5.7 – Corpos-de-prova com aplicação do Universal MetaLine 900 (incolor).	34
Figura 5.8 – Corpos-de-prova com o revestimento elastomérico MetaLine 785.	34
Figura 5.9 – Pistola usada para os ensaios de desgaste erosivo tipo lama e o acessório adaptado no bico com o sistema de alimentação de partículas erodentes utilizando no interior um dispositivo Venturi-acelerador de partículas. Design do acessório e dispositivo Venturi-acelerador de partículas mostrado nas Figuras B.1, B.2, B.3 e B.4 do Apêndice B.	38
Figura 5.10 – Esquema com os parâmetros usados durante o ensaio de desgaste erosivo por lama.	39
Figura 5.11 – Equipamento para ensaios de desgaste erosivo por lama em funcionamento indicando as partes principais do ensaio: (1) tubo de sucção horizontal alimentador de partículas erodentes, (2) bico de saída adaptado ao dispositivo Venturi-acelerador de partículas erodentes; (3) Porta-amostras de alumínio para os ângulos de incidência da amostra avaliados de 30° e 90°.	40
Figura 6.1 – Difratoograma de raios X do revestimento 86WC-10Co4Cr obtido por HVOF.	42
Figura 6.2 – Microestrutura martensítica do aço inoxidável AISI 410 temperado e revenido. (MO, 1000 x, MEV 5000 x, Ataque: Villela)	44
Figura 6.3 – Imagem por MEV da microestrutura do revestimento 86WC-10Co4Cr obtido por HVOF. Ampliação de 500x.	44
Figura 6.4 – Imagem por MEV da região do microanálise elemental na seção transversal do revestimento 86WC-10Co4Cr (Woka 3653) obtido por HVOF utilizando o sistema EDS. Ampliação de 400x.	45
Figura 6.5 – Imagem do espectros quantitativos da região da microanálise elemental na seção transversal do revestimento 86WC-10Co4Cr obtido por HVOF utilizando o sistema EDS.	45
Figura 6.6 – Imagem por MEV na seção transversal do revestimento elastomérico PUR comercial obtido manualmente. Ampliação de 24x.	46
Figura 6.7 – Micrografia óptica (M.O) da seção transversal do revestimento 86WC-10Co4Cr obtido por HVOF e processada sua espessura média no programa Image J. Ampliação de 100x.	47
Figura 6.8 – Micrografia óptica (M.O) da seção transversal do revestimento PUR comercial MetaLine 785 e processada sua espessura média no programa Image J. Ampliação de 50x.	47
Figura 6.9 – Imagem por MEV do revestimento 86WC-10Co4Cr com tratamento de imagem para contrastar claros e escuros para realização da quantificação dos poros. Ampliação de 1000x.	48

Figura 6.10–Micrografia óptica (M.O) da indentação Vickers (1448 HV _{0,3}) realizada para o revestimento 86WC-10Co4Cr. Ampliação de 50x.	50
Figura 6.11–Micrografia óptica (M.O) da indentação Vickers (219 HV _{0,3}) realizada para o aço inoxidável martensítico AISI 410 tratado termicamente. Ampliação de 50x.	51
Figura 6.12–Variação da taxa de erosão volumétrica acumulada, em função do ângulo de ataque de 30°, para os materiais, aço Inox martensítico AISI 410, carbetto de Tungstênio (86WC-10Co4Cr) e o elastômero PUR comercial MetaLine 785.	53
Figura 6.13–Variação da taxa de erosão volumétrica acumulada, em função do ângulo de ataque de 90°, para os materiais, aço Inox martensítico AISI 410, carbetto de Tungstênio (86WC-10Co4Cr) e o elastômero PUR comercial MetaLine 785.	54
Figura 6.14–Áreas das regiões desgastadas dos materiais submetidos ao ensaio de erosão por lama. Coluna da esquerda: ângulo de ataque de 30°. Coluna da direita: ângulo de ataque 90°.	57
Figura 6.15–Digitalização tridimensional dos materiais submetidos ao ensaio de erosão por lama, para a obtenção da profundidade desgastada pelo erodente com o programa Geomagic Studio. Coluna da esquerda: ângulo de ataque de 30°. Coluna da direita: ângulo de ataque 90°.	58
Figura A.1–Design do protótipo do equipamento usado durante o ensaio de desgaste erosivo por lama.	69
Figura B.1–Peça macho do injetor com as dimensões em mm, acessório adaptado no bico da pistola, com o dispositivo Venturi-acelerador de partículas. Visualização 3D feita com o programa Solidworks 2017.	70
Figura B.2–Peça fêmea do injetor, acessório adaptado no bico da pistola, com o dispositivo Venturi-acelerador de partículas. Visualização 3D feita com o programa Solidworks 2017.	70
Figura B.3–Base do injetor, acessório adaptado no bico da pistola, com o dispositivo Venturi-acelerador de partículas. Visualização 3D feita com o programa Solidworks 2017.	71
Figura B.4–Acessório adaptado no bico da pistola, com o sistema de alimentação de partículas erodentes, utilizando no interior um dispositivo Venturi-acelerador das partículas. Visualização 3D feita com o programa Solidworks 2017.	71
Figura C.1–Variação da taxa de erosão volumétrica, em função do ângulo de ataque de 90°, para os materiais, aço Inox martensítico AISI 410, carbetto de Tungstênio 86WC-10Co4Cr e o elastômero PUR comercial MetaLine 785.	72

Figura C.2—Variação da taxa de erosão volumétrica, em função do ângulo de ataque de 30°, para os materiais, aço Inox martensítico AISI 410, carbeto de Tungstênio 86WC-10Co4Cr e o elastômero PUR comercial MetaLine 785.	73
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química do aço Inox martensítico AISI 410 estudado neste trabalho (wt.%)	29
Tabela 2 – Composição química do 86WC-10Co4Cr comercial (Woka 3653) estudado neste trabalho (wt.%)	29
Tabela 3 – Parâmetros de deposição do equipamento de HVOF.	30
Tabela 4 – Propriedades características do elastômero de poliuretano (PUR) comercial MetaLine 785 estudado neste trabalho.	30
Tabela 5 – Composição química da alumina eletrofundida ALO marrom da companhia Treibacher, utilizada como erodente neste trabalho (wt.%)	30
Tabela 6 – Análise granulométrica por difração a laser da alumina eletrofundida utilizada como erodente neste trabalho.	30
Tabela 7 – Parâmetros das análises de DRX.	35
Tabela 8 – Resultado da medida de espessura média do revestimento 86WC-10Co4Cr.	47
Tabela 9 – Resultado da medida da rugosidade média dos revestimentos 86WC-10Co4Cr, PUR e o Aço AISI 410 antes e após da erosão por lama nos ângulos avaliados.	49
Tabela 10 – Resultados das medidas de microdureza Vickers – seção transversal (HV0,3 – Carga 2,94N).	49
Tabela 11 – Taxa de erosão acumulada em perda de volume por massa de erodente impactada, em função do ângulo de ataque para um tempo total de ensaio de 4 minutos, para os materiais de aço Inox martensítico AISI 410, carbeto de Tungstênio (86WC-10Co4Cr) e o elastômero PUR comercial MetaLine 785.	52
Tabela 12 – Área desgastada em função do ângulo de ataque para os materiais aço Inox martensítico AISI 410, carbeto de Tungstênio (86WC-10Co4Cr) e o elastômero PUR comercial MetaLine 785.	55
Tabela 13 – Profundidade media das regiões desgastadas, obtidas da digitalização tridimensional das peças ensaiadas através do programa Geomagic Studio, em função do ângulo de ataque, para os materiais aço Inox martensítico AISI 410, carbeto de Tungstênio (86WC-10Co4Cr) e o elastômero PUR comercial MetaLine 785.	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI	American Iron and Steel Institute
CERMET	Carbetos Cerâmicos em Matrizes Metálicas
PU	Poliuretano
PUR	Espuma rígida de Poliuretano
HVOF	High Velocity Oxy-Fuel
PSP	Plasma Arc Spraying
PTA	Plasma Transferred Arc
M.O	Microscopia Óptica
DRX	Difração de Raios-X
LOI	Loss on Ignition (LOI) of Solid Combustion Residues - Determinação da Perda ao Fogo
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
EDS	Energy Dispersive Spectroscopy
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i> - Organização Internacional de Normalização
A.S.T.M.	American Society for Testing and Materials
T_g	Glass Transition Temperature - Temperatura de Transição Vítrea

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ	Densidade (DIN 53 479)
ε	Deformação
H	Dureza (A.S.T.M. D2240-68)
σ_{at}	Tensão à tração com 100 % de alongamento ($\varepsilon=100$ %) (A.S.T.M. D412-68)
σ_u	Resistência à ruptura / tração (A.S.T.M. D412-68)
E_u	Alongamento até à ruptura (A.S.T.M. D412-68)
τ_R	Resistência ao rasgamento (DIN 53 515)
RR	Resiliência ao impacto (DIN 53 512)
K	Coeficiente de condutividade térmica (DIN 52 612)
HV	Dureza Vickers

RESUMO

Na indústria hidrometalúrgica, diversos materiais são utilizados para a construção dos equipamentos, a fim de satisfazer as necessidades dos processos que estão sujeitos, tendo em conta a importância deles em condições complexas, tais como erosão e a corrosão. Neste trabalho é avaliado o comportamento de um aço inoxidável martensítico AISI 410 tratado termicamente com têmpera e revenimento, frente aos revestimentos Carbetos de Tungstênio (86WC-10Co4Cr) obtido por aspersão térmica (High Velocity Oxygen Fuel-HVOF), e um elastômero PUR comercial MetaLine 785 em condições de desgaste do tipo lama, analisando a perda de volume, a determinação da área e profundidade erodida das amostras, para os ângulos de incidência de 30° e 90° entre o eixo de simetria do fluxo do fluido e a superfície das amostras.

Os ensaios foram realizados para os diferentes tipos de materiais em um equipamento para ensaios simulados de lama, desenvolvido como parte da pesquisa no LACER (Laboratório de Materiais Cerâmicos) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), sob controle de parâmetros como ângulo de impacto e sua velocidade, temperatura de ensaio e concentração de partículas erosivas na suspensão, neste caso foi usada alumina eletrofundida ALO marrom da companhia Treibacher.

Realizou-se a caracterização dos materiais, na sua microestrutura Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Microscopia Óptica (M.O), espessura, rugosidade, porosidade, microdureza e estruturalmente na identificação de fases Difração de Raios X (DRX), Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS), o análise térmico Perda ao Fogo (LOI) para o caso do elastômero PUR, e a distribuição de tamanho de partícula (LG) e morfologia para o erodente.

Com a pesquisa conseguiu-se estabelecer as relações entre o desgaste erosivo por lama e as propriedades físicas relacionadas aos materiais avaliados, nas condições estabelecidas no ensaio de erosão do equipamento, e concluiu-se que o revestimento de 86WC-10Co4Cr carbeto de Tungstênio apresentou uma melhor resistência ao desgaste erosivo tipo lama, em comparação com o aço inoxidável martensítico AISI 410 e o elastômero PUR comercial MetaLine 785.

Palavras-chaves: Carbetos de Tungstênio. Aço inoxidável AISI 410. Poliuretano. HVOF. Erosão por lama. CERMET.

ABSTRACT

In the hydrometallurgical industry, many materials are used in the construction of the equipment in order to satisfy the needs of the processes to which they are subjected, taking into account their importance in complex conditions such as erosion and corrosion. In this work, the behavior of a quenched and tempered AISI 410 martensitic stainless steel is compared to tungsten carbide (86WC-10Co4Cr) obtained by thermal spray (High Velocity Oxygen Fuel - HVOF) and to a commercial elastomer PUR MetaLine 785 under slurry erosion conditions. Volume loss, area determination and eroded depth of the samples were analyzed at angles of incidence of 30° and 90° between the axis of symmetry of the fluid flow and the surface of the samples.

The tests were carried out for the different types of materials in a slurry erosion simulation device, developed as part of the research in LACER (Laboratory of Ceramic Materials) of the Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS), via the control of parameters such as angle and speed of impact, test temperature and concentration of erosive particles in the suspension. In this case, electrofused brown ALO alumina (Treibacher) was used.

The materials were characterized with regard to their microstructure (SEM), thickness, roughness, porosity, microhardness, structure in the phase identification (DRX) (EDS), thermal analysis (LOI) in the case of the PUR elastomer and the particle size distribution (LG) and morphology for the erodent.

The research was able to establish the relationships between the slurry erosive wear and the physical properties related to the evaluated materials, under the conditions established in the erosion test of the equipment. It was concluded that the coating 86WC-10Co4Cr tungsten carbide presented better resistance to the slurry erosion wear when compared to AISI 410 martensitic stainless steel and the PUR commercial elastomer MetaLine 785.

Key-words: Tungsten Carbide. Stainless steel AISI 410 . Polyurethane. HVOF. Slurry erosion. CERMET.

1 INTRODUÇÃO

Em diferentes aplicações industriais, tais como turbinas hidráulicas em usinas hidrelétricas, na indústria petroquímica, na construção civil, no processamento de minerais, bombas de lama, tubos, entre outras, a perda de metal devido à erosão por lama causada pelo material particulado no líquido representa um grande problema industrial, afetando a vida dos componentes e reduzindo seu desempenho. Assim, é muito importante a escolha ideal dos materiais de engenharia a fim de diminuir a taxa de desgaste e melhorar seu comportamento tribológico.

Na procura de melhorias destas condições, tem importância a tecnologia dos tratamentos superficiais e revestimentos de filmes finos pelo fato de entender e estudar os mecanismos gerados na superfície porque deles depende a maioria das falhas que acontecem pela erosão e corrosão. Assim, a fim de otimizar suas propriedades e consequentemente seu desempenho no funcionamento, são imprescindíveis os estudos mecânicos e superficiais dos diferentes tipos de revestimentos.

Entre as diferentes alternativas para tais aplicações que atualmente estão sendo estudadas, se encontram os aços inox austeníticos e martensíticos. Aços inoxidáveis austeníticos são usados em muitos componentes onde a resistência à corrosão é crucial. No entanto, sob ação mecânica de partículas duras, apresentam uma alta deformação plástica e desgaste ([TORO et al., 2001](#)). Por outro lado, o aço inoxidável martensítico apresenta melhor resistência mecânica a partículas erosivas do que o aço austenítico, mas sua resistência à corrosão é menor ([LEVY; YAU, 1984](#)).

Na atualidade, para estas aplicações vêm sendo usados como materiais base aços ferramenta, tipo D (trabalho em frio), H (trabalho a quente), T, M (aços rápidos) segundo a classificação AISI (American Iron and Steel Institute) e carbeto cimentados (*cermets*). Para estes últimos o metal duro é o mais utilizado.

Os materiais *cermets* têm mostrado excelentes resultados de resistência ao desgaste erosivo. *Cermets* à base de WC-Co fornecem propriedades de resistência ao desgaste abrasivo. A resistência à corrosão destes revestimentos pode ser aumentada com a adição de uma pequena quantidade de Cr. A composição WC-10%Co-4%Cr é um conjunto amplamente considerado como revestimento para aplicações em usinas hídras e seus componentes, com a finalidade de prolongar sua vida útil ([KUMAR et al., 2016](#)). Os revestimentos de WCCoCr normalmente são depositados através do processo de aspersão térmica de alta velocidade (HVOF - High Velocity Oxy-Fuel).

Porem , nas últimas três décadas o efeito na erosão de polímeros e compósitos relacionados tem sido intensivamente estudado em vários componentes e sistemas de

engenharia (RAO; BUCKLEY, 1986) (WALLEY; FIELD, 1987).

Materiais poliméricos vêm sendo implementados principalmente pelas excelentes propriedades que oferecem, bem como a densidade e outros benefícios adicionais, como a fácil processabilidade e liberdade de design na formação, especialmente com termoplásticos em estruturas e revestimentos. São frequentemente usados em aplicações onde as peças operam em ambientes com demasiadas partículas sólidas (ZAHAVI; JR, 1981) (BÖHM; BETZ; BALL, 1990).

Um dos materiais comumente utilizados na indústria são os polímeros do tipo elastoméricos como o poliuretano (PU). Depois da solidificação do material como revestimento este confere propriedades semelhantes as da borracha, com uma excelente resistência ao desgaste por ação dinâmica contra a erosão, corrosão e cavitação. O revestimento protetor tem resistência comparável com as ligas especiais e para blindagens de aço, sendo extremamente leve. Isto representa uma poupança considerável de energia sobre os elementos de transporte como, os rotores e impulsores, sendo que seu principal uso é a reparação e conformação de revestimentos duráveis em peças e superfícies (BARKOULA; KARGER-KOCSIS, 2002).

A Figura 1.1 apresenta os resultados de um levantamento realizado junto ao banco de dados do *Science Direct*, onde se buscou artigos científicos dos últimos 9 anos, cujos termos principais pesquisados e resultados foram no total encontradas 6564 publicações de "*Slurry Erosion*", onde 1473 estão relacionados ao termo "*Slurry Erosion of Stainless Steel*", 2049 publicações estão incluídas ao termo "*Slurry Erosion of Polymers*" e 466 "*Slurry Erosion of Tungsten Carbide*". Nesse período, o número de estudos publicados referente a esses quatro termos vem aumentando gradativamente, cerca de 22% (*Slurry Erosion of Stainless Steel*), 31% (*Slurry Erosion of Polymers*) e 7% (*Slurry Erosion of Tungsten Carbide*), comprovando a relevância atual do estudo da erosão por lama em materiais na atualidade.

Neste contexto, e se considerando a importância do estudo e as aplicações deste tipo de materiais, insere-se este trabalho ao investigar e avaliar o desgaste erosivo por lama em um equipamento para ensaios simulados sob impacto normal das partículas erodentes, dos corpos do aço Inox martensítico AISI 410, o revestimento do nanocompósito de carbetto de Tungstênio, com composição 86WC-10Co4Cr obtido pela técnica de aspersão térmica HVOF e o elastômero PUR comercial MetaLine 785. Com isso, pretende-se estudar e avaliar as alternativas dos materiais resistentes ao desgaste erosivo a fim de minimizar os problemas referentes a esse processo de desgaste provocado na indústria, reduzindo as horas de parada, e consequentemente de manutenção dos equipamentos, obtendo-se, com isso, uma redução de custos para as empresas.

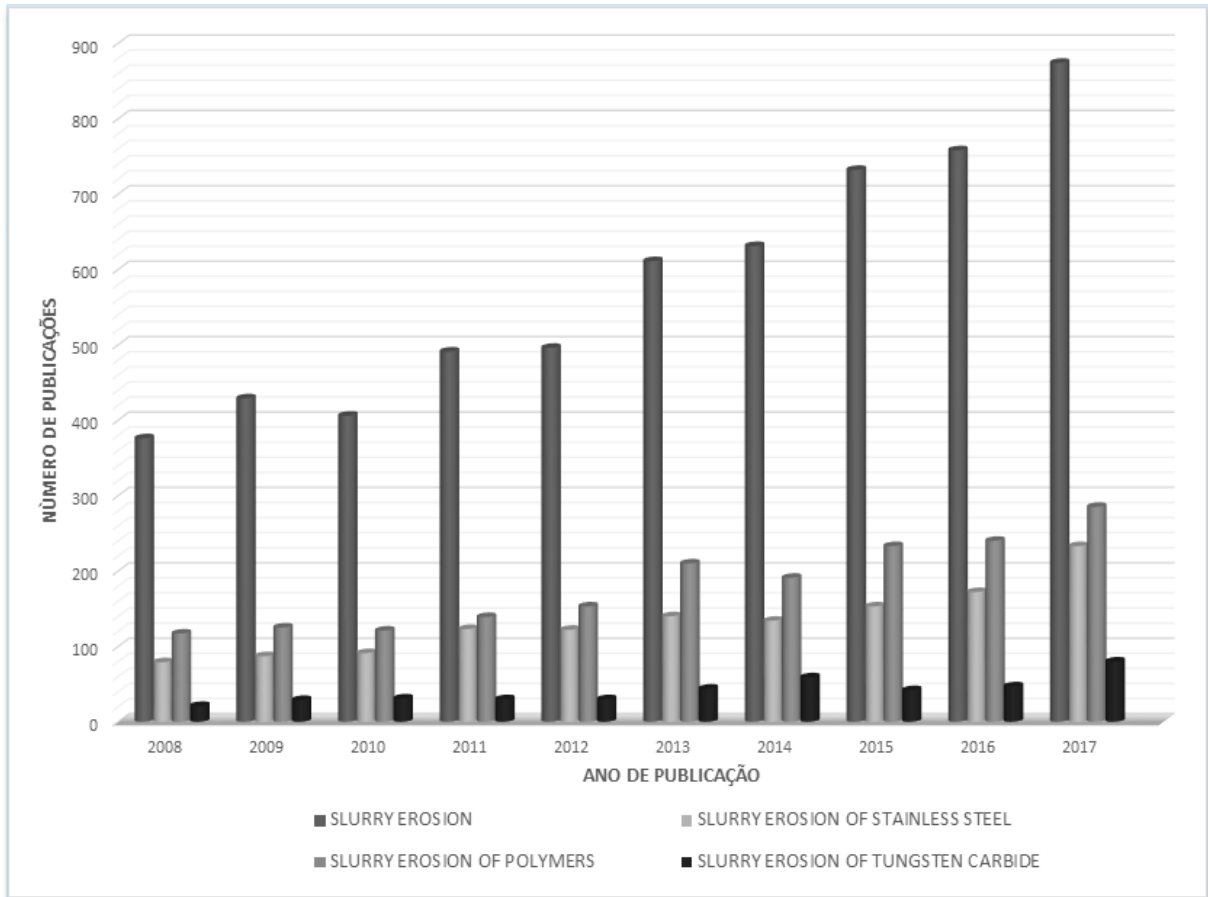


Figura 1.1 – Número de artigos científicos publicados na base de dados do *Science Direct* de "*Slurry Erosion*" e utilizando os termos "*Slurry Erosion of Stainless Steel*", "*Slurry Erosion of Polymers*" e "*Slurry Erosion of Tungsten Carbide*" (<http://www.sciencedirect.com/>), disponível em 09-08-2018)

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento frente ao desgaste do aço Inox martensítico AISI 410 (tratado termicamente com têmpera e revenimento), com um revestimento de carbetto de Tungstênio (86WC-10Co4Cr) obtido pela técnica de aspersão térmica HVOF, e de um revestimento de elastômero PUR comercial MetaLine 785.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para o alcance do objetivo deste trabalho, foi necessário cumprir com as seguintes etapas experimentais específicas:

- Desenvolver um equipamento experimental de simulação de desgaste erosivo do tipo lama, que permita o controle dos parâmetros de teste como o ângulo de impacto, a velocidade do impacto, concentração de partículas erosivas na suspensão e temperatura de ensaio, variáveis que afetam as propriedades mecânicas dos materiais submetidos nas condições propostas pelo trabalho.
- Preparar os corpos de prova metálicos de aço Inox martensítico AISI 410 previamente tratados termicamente com têmpera e revenimento, os revestidos de nanocompósito de carbetto de Tungstênio (86WC-10Co4Cr), obtidos previamente pela técnica de aspersão térmica HVOF, e os revestidos manualmente com o elastômero PUR comercial.
- Caracterizar os revestimentos quanto à microestrutura, espessura, porosidade total, rugosidade superficial, microdureza, estruturalmente na identificação das fases presentes.
- Preparar a superfície dos corpos de prova para a obtenção de uma rugosidade padrão com vista aos ensaios de desgaste erosivo por lama.
- Determinar a taxa de desgaste dos materiais submetidos a erosão do tipo lama nas condições propostas pelo trabalho.
- Estabelecer as relações existentes entre desgaste e as propriedades físicas associadas aos diferentes materiais envolvidos e revestimentos, com as condições estabelecidas no ensaio de erosão por lama no equipamento.

- Investigar os possíveis mecanismos de erosão e sua dependência com as propriedades dos revestimentos, sua microestrutura e as condições estabelecidas no ensaio de erosão por lama no equipamento.

3 LIMITAÇÕES DO TRABALHO DE PESQUISA

A investigação científica realizada neste trabalho apresenta limitações quanto à sua interpretação. Entre estas, destacam-se:

- Os revestimentos foram obtidos através de aspersão térmica HVOF, utilizando-se os parâmetros de aspersão que proporcionaram a maior densificação de cada revestimento. A utilização de outros parâmetros de aspersão, bem como outras técnicas de obtenção dos revestimentos, pode acarretar em modificações na densificação e formação da microestrutura dos mesmos;
- O equipamento que simula a erosão dos corpos cerâmicos foi desenvolvido visando-se controlar os parâmetros velocidade, fluxo de erodente e ângulo de ataque. A interpretação dos resultados obtidos de taxas de erosão com o uso deste equipamento deve considerar seu princípio de funcionamento. Além disso, deve-se considerar o tipo, morfologia e granulometria das partículas erodentes, e o fluido utilizado.

4 REVISÃO DA LITERATURA

4.1 AÇOS INOXIDÁVEIS MARTENSÍTICOS AISI 410

Os aços inoxidáveis são uma classe especial de ligas de aço conhecidas principalmente por suas propriedades resistentes à corrosão. As características de aço inoxidável associadas a essas ligas são obtidas através da formação de um filme na superfície de óxido invisível e aderente rico em cromo que, quando danificado, riscado ou erodido por algum elemento ou tipo de usinagem, tem a rara capacidade de reparar-se na presença de oxigênio, como mostrado na Figura 4.1.

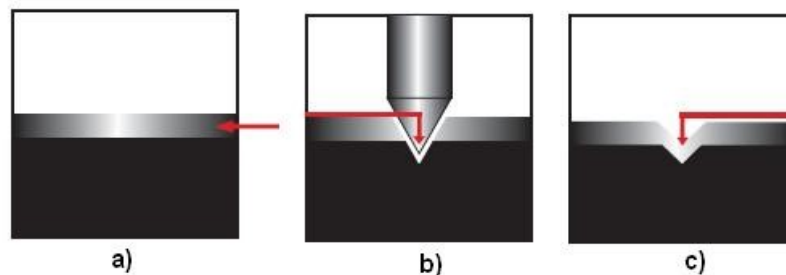


Figura 4.1 – a) O aço inoxidável forma uma camada de óxido de cromo. b) Quando riscado, esta película protetora é removida. c) A camada protetora é restaurada.

O cromo é o elemento de liga que confere resistência à corrosão aos aços inoxidáveis, mas muitos outros elementos podem ser adicionados para estabilizar outras fases, fornecer resistência à corrosão ou produzir propriedades mecânicas melhoradas. Principalmente, são ligas de ferro, carbono, cromo, níquel, molibdênio, nitrogênio, titânio. Em geral, de acordo com a composição química da liga, existem quatro tipos principais de aços inoxidáveis: ferrítico, martensítico, austenítico e duplex. Essas ligas têm sido uma fonte de estudo desde a Primeira Guerra Mundial, pelo fato de que fornecem uma variedade de propriedades mecânicas para muitas aplicações (PECKNER; BERNSTEIN, 1977) (SMITH et al., 2004).

Os aços inoxidáveis martensíticos são a primeira rama dos aços com cromo e podem ser tratados termicamente por têmpera e revenimento. Eles foram os primeiros a desenvolver-se industrialmente e representam uma parte da série 400 AISI com propriedades muito importantes como:

- Endurecíveis por tratamento térmico e, portanto, podem desenvolver altos níveis de resistência mecânica e dureza.
- Facilidade na usinagem.
- Moderada resistência à corrosão.
- São ferromagnéticos.

Os aços martensíticos são essencialmente ligas de cromo e carbono. O teor de cromo é geralmente de 10,5 a 18% e o teor de carbono pode ser alto, atingindo valores de até 1,2%. Exemplos deles são os aços 410, 420, 431 entre outros ([BHUSHAN, 1998](#)).

Os aços inoxidáveis martensíticos AISI 410 (com aproximadamente 12%Cr) são uma excelente opção para aplicações industriais, razão pela qual são normalmente utilizados em usinas hidrelétricas, torres de destilação, plataformas de exploração nas indústrias petroquímicas, fabricação de equipamentos para energia nuclear, turbinas a vapor e gás, ferramentas de corte, construção civil, compressores, componentes na indústria química, processamento de minerais, entre outros, devido às suas propriedades tribológicas no aumento da vida útil de seus componentes com alta resistência mecânica à tração, fluência, fadiga, alta tensão de escoamento, melhor soldabilidade e resistência moderada à corrosão, tanto em altas como baixas temperaturas (até aproximadamente 600°C). As ligas endurecidas por tratamento térmico contêm propriedades que permitiram também seu uso em aplicações como recipientes para armazenagem de ácidos orgânicos ou soluções salinas ([DAVIS, 2000](#)).

As transformações de fase em aços inoxidáveis martensíticos com baixos teores de carbono foram estudadas de forma exaustiva há décadas, devido ao fato de que como resultado dos tratamentos térmicos realizados sobre o material, é obtida uma porcentagem dispersa de austenita na sua microestrutura, o que dependendo da quantidade presente fornece ao material propriedades mecânicas específicas para a fabricação de componentes sujeitos a altas demandas. O controle da quantidade de austenita obtida após tratamentos térmicos no aço é, portanto, importante para o desempenho da peça ([MONIZ, 1994](#)).

A fabricação dos aços de liga resistentes à erosão e para ferramentas baseia-se principalmente em aços ligados com elementos fortes que formam carbeto, como Cr, Mo, W e V. Estes elementos são divididos entre os carbeto e a matriz austenítica durante a solidificação, trabalho a quente, recozimento e austenitização antes do endurecimento. Durante o endurecimento, os carbeto ligados formados na austenita são retidos e a matriz austenítica transforma-se em martensita. Posteriormente, há uma partição dos elementos de liga que ocorre durante o temperamento à medida

que as transformações de austenita retida e os carbonetos de liga fina precipitam na martensita temperada. Todos os elementos da microestrutura fornecem endurecimento e resistência ao desgaste: os carbeto retidos, a martensita temperada e os carbeto formados durante o revenimento. A microestrutura final é uma matriz martensítica com pequenas frações de ferrita delta e austenita estável (CARROUGE; BHADESHIA; WOOLLIN, 2002).

A resistência ao desgaste neste tipo de aço aumenta com o aumento da fração volumétrica de carbeto e o aumento da dureza (KRAUSS, 2015).

Todos os aços inoxidáveis martensíticos podem ser temperados e revenidos e a dureza alcançada dependerá do teor de carbono da liga. Nos aços com baixo teor de carbono, que contém cerca de 12% de Cr e 0,1% de C pode ter uma variedade de níveis de dureza, de 20 a 40 HRC, e nos aços com alto teor de carbono, a dureza pode atingir valores próximos de 60 HRC. Igualmente que aos aços carbono, essas ligas são susceptíveis à fragilidade quando são submetidas a tratamento térmico após endurecimento no intervalo de 450 a 540 °C.

4.2 REVESTIMENTOS POLIMÉRICOS PUR

As primeiras civilizações sul-americanas, como por exemplo a asteca, já utilizavam a borracha para fabricar utensílios elásticos ou para impermeabilizar tecidos. Os alcatrões naturais também foram empregados nos revestimentos para navios (BILLMEYER, 1975).

Durante a Segunda Guerra Mundial foi quando começaram a produzir em grande escala o desenvolvimento da tecnologia de polímeros; a partir de 1940, foi extremamente rápido, principalmente devido aos conceitos desenvolvidos por cientistas líderes no campo (SEYMOUR; CARRAHER, 2000).

Os revestimentos orgânicos, que são compostos principalmente de polímeros, são geralmente formulados para obter uma suspensão líquida, que quando seca, forma uma camada fina sobre o substrato (pode ser metálico, cerâmico ou polimérico). Esses revestimentos apresentam uma grande diversidade de cores e texturas. Os revestimentos para proteção contra desgaste, ao contrário dos decorativos, possuem uma série de demandas em termos de propriedades mecânicas e tribológicas, que devem ser garantidas para oferecer a resistência desejada (EBEWELE, 2000).

Estes revestimentos são projetados para cumprir uma ou várias funções, como proteger a superfície do substrato contra danos externos, melhorar a aparência do produto, aumentar a resistência ao desgaste e reduzir o atrito da superfície. Eles também têm a capacidade de melhorar a condutividade elétrica, aumentar a resistência elétrica, preparar uma superfície para processamento posterior e reconstruir superfícies

erodidas ou danificadas durante o serviço ([CALLISTER; RETHWISCH, 2011](#)).

Os revestimentos protetores são principalmente constituídos por uma resina polimérica em que as partículas sólidas são suspensas, como pigmentos de tinta, ou em casos para proteção contra erosão por partículas sólidas ou por cavitação, são geralmente suspensas partículas de cerâmica, metal ou borracha usadas para suportar a ação de partículas erosivas, ondas de pressão ou jatos líquidos ([BAGHERI; MAROUF; PEARSON, 2009](#)).

A matriz polimérica normalmente possui uma função amortecedora, enquanto as partículas servem como reforço e aumentam a resistência mecânica. Alguns revestimentos poliméricos protetores, especialmente anticorrosivos e decorativos, têm solventes. No entanto, a maioria deles resistentes à erosão, por cavitação ou por partículas sólidas, são geralmente compostos por sistemas de polímeros que são fluidos que se secam depois de um tempo de mistura, já que a presença de solventes pode gerar poros na superfície do material, o que geraria núcleos de crescimento para as fissuras e levaria assim a uma maior taxa de perda de material. Comumente, estes revestimentos têm uma série de aditivos que realizam funções específicas em termos reológicos, cor, processo de cura, entre outros. Esses aditivos em muitos dos casos são difíceis de reconhecer e/ou a presença deles não é explicitamente relatada pelo fabricante devido a questões de sigilo comercial ([ROMAN; BIENVENU; GAUGER, 1997](#)).

Para proteger materiais contra desgaste por erosão ou cavitação em meios corrosivos, principalmente são utilizadas matrizes poliméricas como poliuretano e resinas epoxi, com o objetivo de absorver a energia de impacto das partículas do meio erosivo. Para o desenvolvimento destes revestimentos protetores, na matriz são espalhadas uma série de partículas que a fortalecem e fornecem melhores propriedades mecânicas, o que permite um melhor comportamento contra o desgaste ([BAGHERI; PEARSON, 1996](#)).

As partículas de reforço podem ser de vários tipos. Uma das quais apresentam um bom comportamento na proteção e comumente usadas neste tipo de materiais compósitos são as partículas cerâmicas de tamanho micrométrico e nanométrico, cuja função é fazer com que as partículas erosivas geralmente maiores que estão suspensas no líquido que afetam o material encontrem maior oposição para o acesso ao substrato. Além disso, a matriz em que essas partículas são uniformemente espalhadas permite que a energia seja dissipada ([CHEN et al., 2008](#)) ([BAGHERI; MAROUF; PEARSON, 2009](#)).

4.2.1 POLÍMEROS ELASTOMÉRICOS

Os elastômeros formam uma grande família de polímeros amorfos com baixa temperatura de transição vítrea. Eles têm uma habilidade característica de sofrer grandes deformações elásticas sem ruptura. Eles são moles e têm um baixo módulo de elasticidade. O termo elastômero é derivado das palavras *elastic* e *mero*. A estrutura destes polímeros é muito torcida (fortemente torcida ou enrolada). Eles se estendem, mas depois retornam à sua forma original uma vez que a carga é removida (CHAWLA; MEYERS, 1999).

Os materiais elastoméricos são aqueles formados por polímeros que são unidos por ligações químicas, adquirindo uma estrutura final ligeiramente reticulada. Exemplo dos polímeros que são classificados como elastômeros são os poliuretanos, poliosopreno ou borracha natural, polibutadieno e poliisobutileno (BUDINSKI; BUDINSKI, 2009).

Segundo a disposição tridimensional das cadeias poliméricas, existem 2 tipos de polímeros:

- **Polímeros Cristalinos:**

São polímeros que possuem semi cadeias paralelas e são organizados em "feixes", como mostrado na Figura 4.2, e são os materiais utilizados principalmente para sacolas plásticas, como polietileno ou poliestireno e também como material para a fabricação dos tubos de PVC.

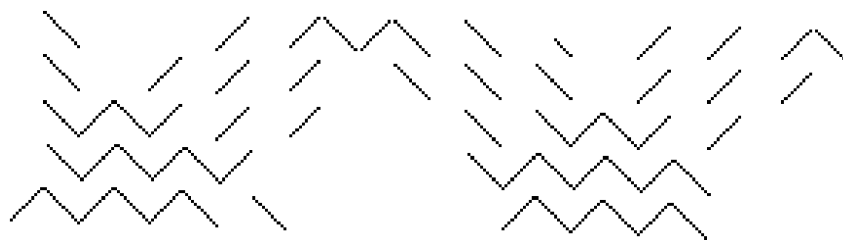


Figura 4.2 – Estrutura dos polímeros cristalinos.

- **Polímeros Amorfos:**

São aqueles polímeros cujas cadeias não têm nenhuma ou muito pouca ordem específica, conforme descrito na Figura 4.3. Tipicamente, estes são os polímeros utilizados em resinas para os diferentes revestimentos.

Nem todos os polímeros amorfos são elastômeros, alguns são termoplásticos. Para que o polímero amorfo seja um termoplástico ou um elastômero, depende da

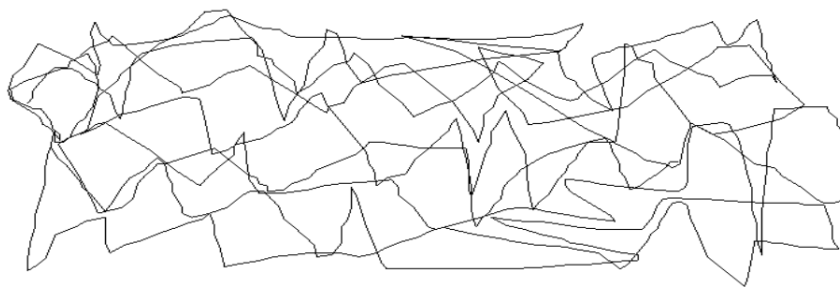


Figura 4.3 – Representação de polímero amorfo.

temperatura de transição vítrea, ou T_g . Esta é a temperatura acima da qual um polímero torna-se macio e dúctil, e abaixo da qual torna-se duro e quebradiço, como o vidro.

Se um polímero amorfo tiver uma T_g abaixo da temperatura ambiente, será um elastômero, porque é macio e elástico à temperatura ambiente.

Se um polímero amorfo tiver uma T_g acima da temperatura ambiente, será um termoplástico, pois a baixo dessa temperatura é duro e quebradiço. Assim, como regra geral para os polímeros amorfos, temos que os elastômeros possuem baixa T_g e os termoplásticos têm T_g alta. Isso não é aplicável nos polímeros cristalinos (TRELOAR, 1975).

Na classificação de materiais elastoméricos se encontram:

- **Elastômeros Termoestáveis:**

São os elastômeros que, quando aquecidos, não derretem nem se deformam.

- **Elastômeros Termoplásticos:**

São os elastômeros que derretem e se deformam quando aquecidos. Eles são uma classe de copolímeros ou mistura física de polímeros (geralmente um plástico e uma borracha) que dão origem a materiais com características termoplásticas e elastoméricas. A reticulação em elastômeros termoplásticos é formada por dipolos ou ligações fracas por ligações de pontes de hidrogênio.

4.2.2 PROPRIEDADES DOS REVESTIMENTOS POLIMÉRICOS PUR

Os revestimentos poliméricos PUR são polímeros obtidos normalmente a partir de um isocianato e um poliálcool do tipo poliéter ou poliéster. Devido a tais componentes serem líquidos, a reação de polimerização é usualmente efetuada no instante em que o substrato é revestido.

O poliuretano é um material com extensas aplicações de manutenção e proteção, não só na proteção de materiais contra o desgaste. Também ele permite resistir a uma ampla gama de líquidos corrosivos, tornando-se um material adequado para a proteção de materiais contra corrosão e a umidade, evitando que este tipo de substâncias

alcance o material para afetá-lo e degradá-lo severamente. Segundo (TSIANG, 1986) os revestimentos de poliuretano e fluoroelastômero foram relatados como os revestimentos poliméricos mais resistentes à erosão no meio aquoso.

Outra aplicação dos poliuretanos é que também são usados como isolante térmico, devido a que uma das principais propriedades deste tipo de materiais é a baixa condutividade térmica que possuem e melhor comportamento do que muitos outros materiais usados para o isolamento.

Mecanicamente, os poliuretanos são geralmente materiais plásticos que apresentam um alto módulo de tensão e deformação, juntamente com alta elongação. Esta combinação transmite dureza e durabilidade aos revestimentos de poliuretano, o que fornece uma excelente resistência à erosão em comparação com outros materiais poliméricos (MARDEL; CHYNOWETH; HILL, 1995) (BARKOULA; KARGER-KOCSIS, 2002).

Os materiais elastoméricos PUR tem a capacidade de recuperação total ou parcial sob múltiplos impactos, pelo que sua resistência à erosão é superior em comparação com outros revestimentos poliméricos (rígidos) (JR, 1971).

Os poliuretanos possuem resiliência variável de acordo com as aplicações desejadas e obtêm-se de acordo com o comprimento que é alcançado nas cadeias do polímero, o que permite grandes variações na dureza, resistência e comportamento elástico do material. Além disso, estes mantêm seu comportamento, sem importar as amplas mudanças na temperatura ambiente (BARKOULA; KARGER-KOCSIS, 2002).

Alguns dos métodos disponíveis para aplicar revestimentos poliméricos incluem o uso de escovas e rolos, pulverização, imersão e revestimento de fluxo. Em alguns casos em que sucessivas camadas de revestimento são aplicadas na superfície do substrato, o tempo de cura entre elas é imprescindível, igualmente à uniformidade e à porosidade para se obter o resultado desejado (GROOVER, 1997).

4.3 REVESTIMENTOS CERMET CARBETO DE TUNGSTÊNIO (86WC-10CO4CR)

4.3.1 CARBETOS CIMENTADOS (CERMET)

Os carbetos cimentados, ligas também conhecidas como metal duro, são materiais metalúrgicos em pó obtidos a partir de pós finamente divididos de partículas duras de carbonetos refratários, geralmente tungstênio, mas também titânio, tântalo, nióbio, cromo, molibdênio e vanádio, sinterizados com um ou mais metais do grupo de ferro (ferro, cobalto, cromo ou níquel), que constituem a fase aglutinante e formam uma liga

de alta dureza, alta resistência à compressão, desgaste e resiliência. As propriedades do metal duro podem ser modificadas variando a porcentagem de fase do aglutinante e partículas duras e o tamanho destes (OYAMA, 1996).

O compósito cermet (cerâmica-metal) é um material metálico duro que combina a alta dureza, resistência ao desgaste e estabilidade química da fase cerâmica (carbeto de tungstênio, WC), com ductilidade e tenacidade da fase metálica (cobalto, Co). O Co é amplamente utilizado como ligante metálico, devido à sua alta molhabilidade e boa solubilidade com WC, e boas propriedades mecânicas (NEMETH; GRAB, 1986) (GOMES, 1995).

Os cermets WC-Co são formados por uma distribuição homogênea de grãos facetados WC incorporados em uma matriz Co, cujas propriedades dependem principalmente da sua composição, microestrutura e pureza química dos carbetos.

A excelente resistência destes materiais ao desgaste que supera entre 12 e 20 vezes a resistência do aço rápido é devida à sua combinação única de alta dureza e níveis moderados de tenacidade à fratura (MCCOLM, 1983).

4.3.2 REVESTIMENTOS OBTIDOS POR ASPERSÃO TÉRMICA

Os revestimentos aplicados pela tecnologia de aspersão ou pulverização térmica são formados através da deposição com alta velocidade e energia de impacto de camadas sucessivas de *splats* provenientes da fusão do material de partida sob a forma de pó, arame ou vareta (milhões de partículas por cm^2/seg) que se achatam e solidificam sobre uma superfície fria do substrato, resultando em uma fina estrutura macro conhecida como lamelas ou *splats* que é mecanicamente ancorada às irregularidades da superfície. A estrutura típica de revestimentos por aspersão térmica é uma adesão coesiva de placas do material pulverizado em combinação com inclusões de óxido, microfissuras, partículas sólidas e porosidade (ZHANG et al., 2001) (LOCATELLI, 2009). Na Figura 4.4 se mostra a seção transversal destes tipos de revestimentos. (<<https://www.fst.nl/about/thermal-spray-proces-what-is-thermal-spray/>>, disponível em 27-11-2017).

As características físicas e o comportamento das camadas aplicadas dependem das forças coesivas entre as placas, o tamanho e a morfologia da porosidade, fissuras e defeitos na microestrutura ultra fina e granulosa dentro das mesmas. Uma lamela é o resultado de uma gota de material fundido, de aproximadamente dez a cem microns de diâmetro, é fundida pela chama e impacta na superfície, onde resfria rapidamente aplanar-se e solidifica, com uma taxa de resfriamento de aproximadamente entre 10^6 e 10^8 K/s (ZIRARI; EL-HADJ; BACHA, 2010).

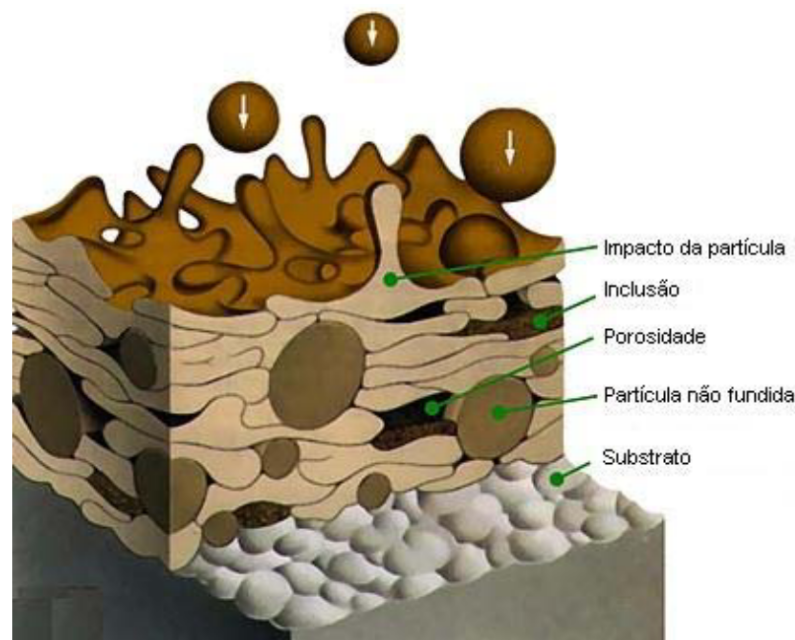


Figura 4.4 – Microestrutura típica de revestimentos aspergidos termicamente (adaptado de FLAME SPRAY TECHNOLOGIES, 2016) .

Os aspectos da formação e solidificação das placas, são complexos e estão ligados também com a forma das folhas. A forma é fortemente influenciada pelo ângulo de aspersão, pelo fato de que tem um importante efeito sobre as características do revestimento, tais como a porosidade, a microdureza, e a eficiência mesma (CINCA; LIMA; GULEMANY, 2013).

A variação dos parâmetros de aplicação do revestimento de aspersão térmica afeta as propriedades dele, em relação ao tamanho e distribuição da porosidade, conteúdo de óxido, tensões residuais, fissuras em escalas macroscópicas e microscópicas, que têm impacto direto sobre a vida e a qualidade dos mesmos (FINCKE et al., 2001).

Para obter boa aderência do material projetado no metal base, deve ser realizada uma preparação prévia eliminando todos os tipos de contaminantes e mantendo a rugosidade da superfície, pois o mecanismo principal de aderência do revestimento ao substrato é a ancoragem mecânica. Além disso esta preparação depende da espessura do revestimento a ser obtido, da natureza do material projetado e da forma da peça a ser revestida. A preparação adequada do substrato antes da aplicação do revestimento é muito importante porque influencia significativamente a resistência da união e a adesão do revestimento ao substrato (ARÉVALO, 2014).

A adesão entre o revestimento por aspersão térmica e o substrato pode ser mecânica, metalúrgica, química, física ou uma combinação dessas formas (TIPTON, 2002). A adesão é influenciada por uma série de fatores, como o material de revestimento, a condição do substrato, a rugosidade da superfície, a limpeza, a temperatura

da superfície antes, durante e após da aspersão térmica e a velocidade de impacto da partícula (TREVISAN; LIMA, 2002).

Vários metais, cerâmicos, compósitos inter-metálicos, alguns polímeros e vidros podem ser depositados por um ou mais dos processos de aspersão térmica, em diferentes tipos de substratos, como metais, óxidos, cerâmicos, vidros e polímeros.

A seleção apropriada do processo de aspersão térmica é determinada pelo material desejado como revestimento, requisitos de desempenho, tamanho e forma da peça, bem como fatores econômicos. As técnicas de pulverização térmica utilizam sistemas de combustão a chama, Oxi-Combustível de Alta Velocidade (HVOF), detonação, sistemas de arco elétrico, arco elétrico com propulsão, sistemas de plasma com arco transferido (PSP-Plasma Arc Spraying) e não transferidos (PTA- Plasma Transferred Arc). O primeiro sistema usa gases de combustão como fonte de calor. O segundo e o terceiro sistema estão constituídos pelos processos que usam energia elétrica como fonte de calor (DAVIS et al., 2004).

Os materiais de revestimento podem ser aplicados usando vários processos diferentes. Os métodos de revestimento térmico utilizam sistemas de combustão de combustível, aspersão de plasma e arco elétrico. Os revestimentos podem ser aplicados em condições atmosféricas padrão ou em ambientes atmosféricos especializados e altamente controlados mesmo sob a água. Os revestimentos podem ser aplicados manualmente ou com a precisão automatizada da robótica orientada por software. (<<https://www.fst.nl/about/thermal-spray-proces-what-is-thermal-spray/>>, disponível em 27-11-2017).

O processo de aspersão térmica é classificado através de:

- Material de estoque de alimentação.
- Fonte de energia térmica.
- Energia cinética produzida.

A Figura 4.5 apresenta o fluxograma dos tipos de processos de aspersão térmica. Neste trabalho, será abordado o método de HVOF.

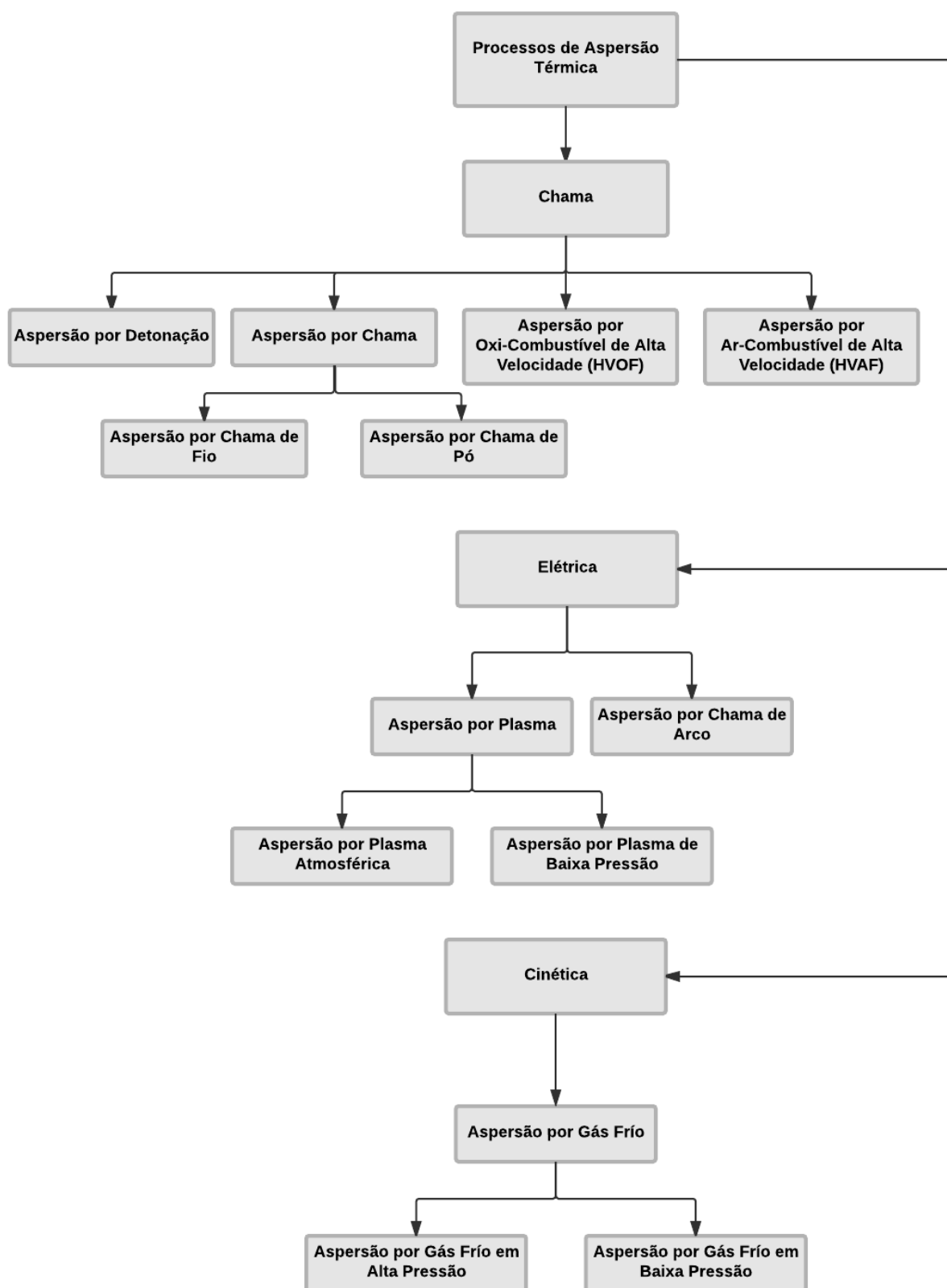


Figura 4.5 – Tipos de processos de aspersão térmica.

4.3.2.1 Aspersão Térmica HVOF - High Velocity Oxy-Fuel

Um dos processos industriais mais utilizados para mitigar os efeitos nocivos da erosão por lama é o HVOF (High Velocity Oxy-Fuel), aplicados em revestimentos WC-Co, a taxa de desgaste pode chegar a diminuir até 1000 vezes em comparação com alguns aços inoxidáveis dependendo do ângulo de impacto (CLARK; HAWTHORNE; XIE, 1999).

A aspersão térmica HVOF é um processo destinado a acelerar as partículas fundidas a velocidades extremamente altas, pois sua combustão de uma mistura de combustível (querosene, propano, propileno, hidrogênio ou acetileno) e oxigênio ocorre em uma pequena câmara, dando como resultado uma descarga de gases de dióxido de carbono, vapor de água e uma expansão térmica pelo esgotamento desses gases. Devido à alta pressão criada na câmara de combustão, os gases geram velocidades supersônicas (foram observadas velocidades do gás de 2000 m/s), acelerando as partículas fundidas. Embora as partículas não atinjam a velocidade gerada pelos gases, elas atingem velocidades muito altas de aproximadamente de 750 m/s. A Figura 4.6 ilustra de forma esquemática o processo de aspersão térmica por HVOF e a Figura 4.7 mostra o equipamento em funcionamento.

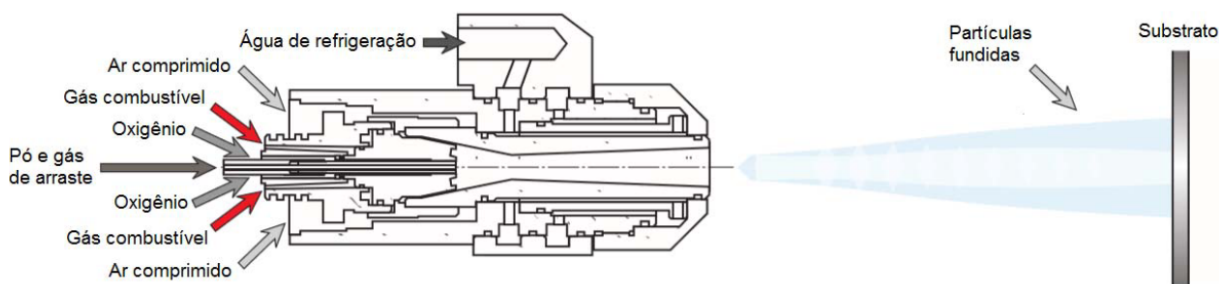


Figura 4.6 – Representação esquemática do processo de aspersão térmica por HVOF (adaptado de OERLIKON METCO).



Figura 4.7 – Equipamento de aspersão térmica similar ao empregado nos revestimentos em funcionamento (adaptado de FLAME SPRAY TECHNOLOGIES, 2016).

Uma das mais importantes vantagens da técnica HVOF em relação aos demais processos de aspersão térmica, entre eles o tipo plasma, é a alta velocidade alcançada pelas partículas e as baixas temperaturas envolvidas (revestimentos com menor decomposição de carbeto que outros processos de deposição), o que minimiza os danos ao revestimento e ao substrato (KULU; PIHL, 2002).

Os revestimentos produzidos por HVOF, especialmente com base WC, são duros, com baixa porosidade, uma microestrutura homogênea e reduzida decomposição química, densos e de alta qualidade, exibindo uma alta aderência (alguns acima de 12.000 PSI ou 83 MPa), ao substrato, baixa oxidação e excelente resistência ao desgaste para maior durabilidade e rentabilidade dos componentes (RAYES; ABDO; KHALIL, 2013).

Alguns parâmetros são muito importantes para as propriedades dos revestimentos depositados por HVOF, como a preparação e temperatura do substrato; composição, morfologia e distribuição de tamanho dos pós; controle do fluxo dos gases, movimentação relativa da pistola e do substrato, ângulo de deposição, entre outros (BERGMANN; VICENZI, 2011).

Tudo isso contribui para que os revestimentos cermet de WC-CoCr aspergidos geralmente por HVOF possam sobreviver a condições de serviço mais severas, particularmente em aplicações de desgaste em meio aquoso e corrosivo, aumentando muito a vida útil.

4.4 EROSÃO EM REVESTIMENTOS CERMET

A erosão em cermet é muito complexa devido ao seu caráter não-homogêneo. Todavia, a teoria clássica da erosão referente à dependência da natureza do material dúctil ou frágil não pode ser usada para explicar completamente a erosão destes.

Segundo (HUSSAINOVA; KUBARSEPP; PIRSO, 2001), a erosão de cermet de WC-Co está associada com a combinação de ductilidade e fragilidade na erosão, embora a fragilidade seja dominante. Isso tem a ver com o diferente comportamento das distintas classes de materiais expostos a erosão como, por exemplo, em relação ao ângulo de impacto. Em baixos ângulos os materiais cerâmicos reduzem o desgaste erosivo devido a elevada dureza e tenacidade (FINNIE, 1995). Por outro lado, se um material está sujeito ao impacto de partículas em ângulo próximo à normal (90°), a superfície exposta deve ser capaz de suportar repetidas deformações. Neste caso, materiais metálicos têm preferência em relação aos cerâmicos, nos quais as trincas progridem rapidamente e conduzem à remoção do material. Esta relação entre as propriedades dos materiais e a resistência ao desgaste é mostrada na Figura 4.8.

Porém, em algumas situações, há uma mistura de mecanismos que conduz ao desgaste erosivo, como mecanismos de corte, lascamento, fadiga e fratura frágil. Nes-

tes casos, há uma controvérsia entre a dureza e a tenacidade à fratura dos materiais e revestimentos. Segundo (KULU; HUSSAINOVA; VEINTHAL, 2005), os revestimentos compósitos de matriz metálica reforçados com partículas cerâmicas resolvem parcialmente este problema, como é apresentado na Figura 4.8. Revestimentos de maior dureza e menor tenacidade são mais indicados para resistirem ao desgaste em ângulos de ataque das partículas erodentes até 30°.

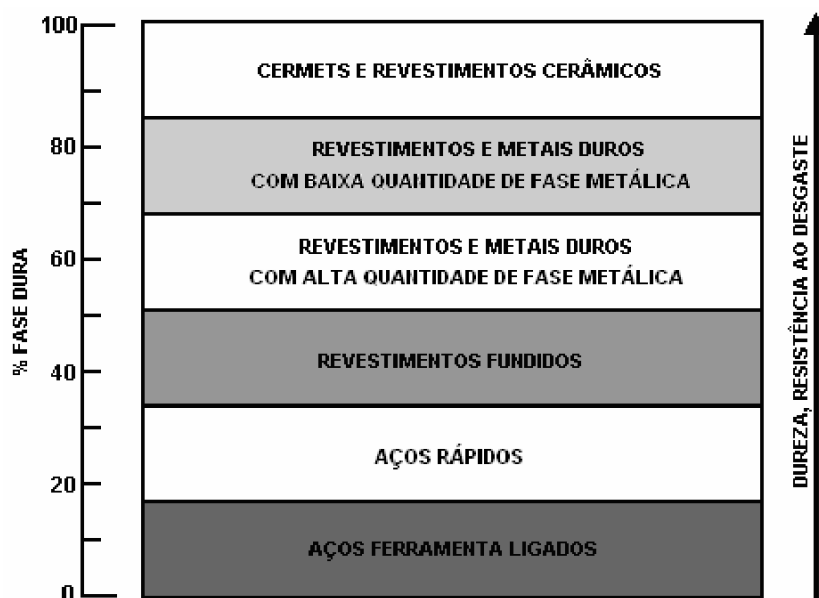


Figura 4.8 – Resistência ao desgaste de materiais e revestimentos (KULU; HUSSAINOVA; VEINTHAL, 2005).

Os materiais aspergidos termicamente, como os cermets, são freqüentemente usados para resistir a diferentes formas de desgaste, em diversas aplicações industriais, no meio aquoso e inclusive em situações de erosão extrema. Em condições de desgaste nas quais há mistura de mecanismos, os revestimentos aspergidos termicamente à base de WC-Co são altamente efetivos (KULU; HUSSAINOVA; VEINTHAL, 2005).

Os grãos de WC são duros e suficientemente resistentes para dissipar grande quantidade de energia no choque das partículas erodentes, sem que ocorra o microtrincamento dos grãos. Portanto, segundo (ENGQVIST; AXEN; HOGMARK, 1999) (HUSSAINOVA; KUBARSEPP; PIRSO, 2001) as propriedades mecânicas e a resistência ao desgaste de cermets dependem de cada grão individual, da matriz, da ligação entre as fases e dos grãos adjacentes.

A combinação de propriedades físicas e mecânicas dos cerâmicos com os metais, como a alta dureza, resistência mecânica, rigidez e resistência ao desgaste dos cermets, fazem que sejam muito utilizados como materiais de revestimentos na indústria hidrometalúrgica (WANG; VERSTAK, 1999) (UPADHYAYA, 2001).

4.4.1 DESGASTE

O desgaste é conhecido desde que o ser humano começou a usar elementos naturais que serviram como utensílios domésticos. Este fenômeno, como corrosão e fadiga, é uma das formas mais importantes de degradação de peças, elementos mecânicos e equipamentos industriais.

Segundo a norma ASTM G40-17 ([STANDARD, a](#)) desgaste pode ser definido como alteração de uma superfície sólida pela perda progressiva ou deslocamento progressivo de material devido à movimentação relativa entre essa superfície e a substância em contato. Este fenômeno geralmente é manifestado nas superfícies dos materiais, afetando assim a microestrutura deles e portanto a perda de propriedades. Em muitos casos, o desgaste é iniciado por um mecanismo e pode ser continuado por outros mecanismos de desgaste.

O desgaste para fins de engenharia é descrito, segundo ([BAYER, 1994](#)), como sendo um dano superficial provocado por uma interação mecânica com outra superfície, corpo ou fluido. Nesta interação, atuam os chamados mecanismos de desgaste, que envolvem uma série de fenômenos físicos e químicos e se torna preocupante na medida em que o dano causado interfere no funcionamento adequado do componente em questão.

Os mecanismos de dano em materiais são principalmente devidos à deformação plástica, formação e propagação de trincas, corrosão e/ou desgaste. Não existe consenso quando se trata de definir e classificar os muitos processos de desgaste. Cada processo de desgaste envolve fenômenos que o caracterizam. Em muitas situações, um dos modos de desgaste atua de tal modo que influencia os outros ([HANDBOOK, 1992](#)) ([DAVIS et al., 2004](#)).

Segundo a norma DIN 50 320 ([NORMA, 1997](#)), há oito mecanismos de desgaste: adesão, abrasão, erosão e reação triboquímica (corrosão-desgaste). Esta mesma norma cita ainda que, além destes mecanismos, existem outros tipos de desgaste, tais como: cavitação, fadiga de contato, *fretting* e *scuffing*, que também são causas de deterioração de materiais.

A ASTM G40-17 ([STANDARD, a](#)) define o desgaste abrasivo como a perda de massa resultante da interação entre partículas rígidas ou rugosidade que é forçada contra uma superfície e se move ao longo dela. A diferença entre desgaste abrasivo e o desgaste de deslizamento ou adesivo é o grau de desgaste entre os corpos envolvidos (maior em desgaste abrasivo), seja por natureza, tipo de material, composição química ou configuração geométrica.

A taxa de desgaste depende do grau de penetração do abrasivo na superfície do material que está sofrendo abrasão. O desgaste será maior quanto mais duro for

o abrasivo em relação à superfície que está sofrendo desgaste (LUDEMA, 1996). A superfície desgastada está sujeita a uma carga elevadíssima (em uma pequena área) que causa não somente a penetração do abrasivo, mas pode causar também a fratura de fases duras presentes na superfície e a própria deformação plástica da matriz. Para (DONG; JAHANMIR; HSU, 1991), os fatores que afetam a taxa de desgaste abrasivo são as propriedades da superfície e do abrasivo, assim como a natureza e a severidade das interações entre si.

O desgaste adesivo está associado a qualquer formação e posterior quebra de ligações adesivas entre as interfaces, quando duas superfícies são colocadas em contato e ocorre transferência de material de uma superfície para outra durante o movimento relativo, devido à formação de junções na fase sólida (LUDEMA, 1996). A origem deste tipo de desgaste está geralmente baseada no mesmo fenômeno que é responsável pela fricção.

O desgaste por cavitação é um fenômeno onde pequenas bolhas são formadas em um fluido submetido a altas velocidades ou ondas sonoras de alta energia. Este fenômeno desgasta o material devido às grandes pressões transitórias durante o colapso das bolhas. As micro-bolhas são formadas em regiões de baixa pressão durante o escoamento e sofrem colapso nas regiões de elevada pressão, removendo material da superfície e formando microcavidades (HARVEY; MCELROY; WHITELEY, 1947).

Este tipo de desgaste é menos agressivo do que a erosão e parece ser controlado pela resistência à fadiga dos materiais. A ocorrência deste tipo de desgaste é comum na maioria das máquinas sujeitas a vibrações durante a operação, como máquinas hidráulicas, tubulações e, de modo geral, em qualquer dispositivo onde exista fluxo/escoamento de fluidos (SZERI, 1980) (LUDEMA, 1996).

4.4.2 EROSÃO

Segundo norma ASTM G76-13 (STANDARD, b) erosão é definida como a perda progressiva de material de uma superfície sólida devido à interação mecânica entre a superfície e um fluido, um fluido multicomponente ou partículas líquidas ou sólidas impactantes.

O fenômeno da erosão tem sido estudado desde o século XIX, porém o primeiro artigo técnico sobre erosão apareceu no início do século XX (FINNIE, 1995). Isto significa que o fenômeno da erosão em materiais é constatado há muito tempo atrás em muitos sistemas tecnológicos e de Engenharia. Porém, uma análise mais bem fundamentada sobre o processo de erosão ocorreu apenas mais tarde, envolvendo a análise da estrutura de superfícies erodidas (SHEWMON; SUNDARARAJAN, 1983).

Para (BHUSHAN, 2013)), a erosão é um tipo de desgaste causado pelo impacto repetitivo de partículas sólidas ou líquidas ou a implosão de bolhas formadas no fluido contra a superfície de um corpo sólido.

A erosão é frequentemente observada em uma grande variedade de condições ambientais, principalmente naquelas que envolvem transporte de fluídos (líquidos ou gases), com ou sem a presença de particulados. Como exemplos de equipamentos e componentes que estão sujeitos a este tipo de desgaste, citam-se: transportadores pneumáticos, turbinas, tubulações, bombas, válvulas, conexões, entre outros (ANNA, 2008).

A erosão pode ser classificada em função de seis diferentes mecanismos de desgaste por erosão (GAHR, 1987): (a) erosão por partículas sólidas em meio gasoso; (b) erosão por partículas sólidas em meio líquido; (c) erosão devido à ação de líquidos; (d) erosão-corrosão, (e) erosão por cavitação e (f) erosão térmica. Cada tipo de erosão tem seu mecanismo particular e depende de condições específicas.

Segundo (BERTHIER, 1990), em materiais dúcteis, como metais e polímeros, o desgaste erosivo ocorre preferencialmente através da deformação plástica, deslocamento ou ação de corte da partícula erodente.

Nos materiais frágeis, como os cerâmicos, têm grande susceptibilidade a trincas e microfissuras. Portanto, são removidos pela interligação de trincas que divergem do ponto de impacto da partícula erodente com a superfície (HOPPERT, 1989).

A velocidade das partículas, o ângulo de impacto, e o tamanho das partículas abrasivas fornecem uma proporção da energia cinética da colisão das partículas. Partículas de desgaste são formadas na erosão como resultado de sucessivos impactos. A relação entre a taxa de desgaste e o ângulo de impacto é diferente para materiais dúcteis e frágeis, como mostrado na Figura 4.9. Para materiais dúcteis a erosão máxima ocorre aproximadamente no ângulo de 30° e no caso de materiais frágeis, a taxa máxima de erosão ocorre em impactos normais. A forma das partículas abrasivas também afeta a taxa de desgaste. Partículas achatadas levam a uma deformação mais localizada e por isso terão taxas de desgaste maiores do que partículas arredondadas (INGOLE et al., 2013).

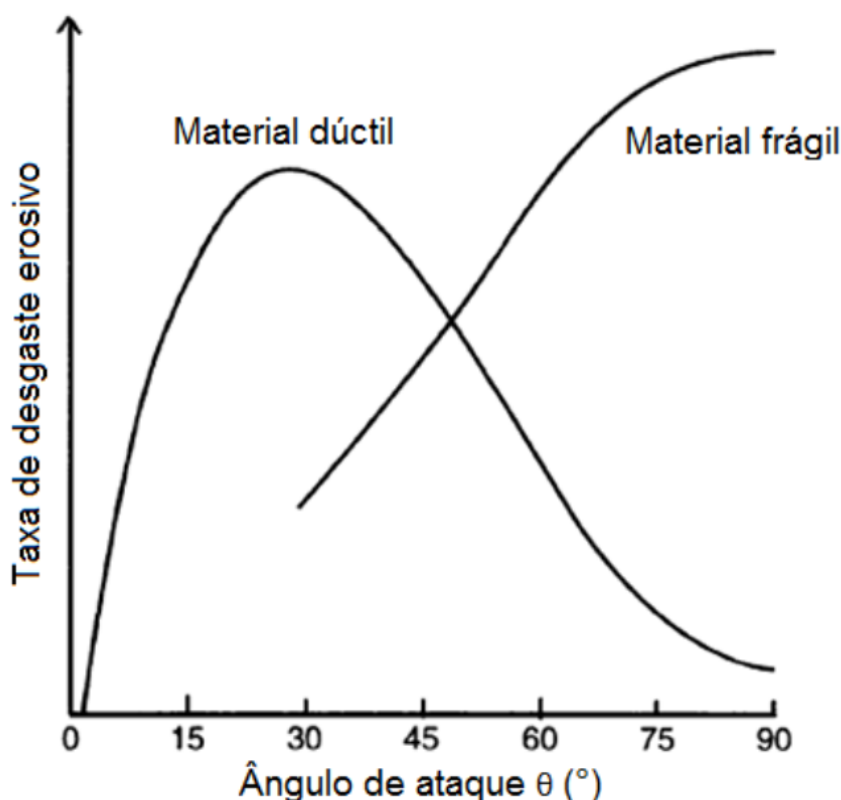


Figura 4.9 – Taxa de desgaste erosivo em função do ângulo de ataque (colisão) das partículas para materiais dúcteis e frágeis (adaptado de (INGOLE et al., 2013)).

4.4.3 EROSÃO POR LAMA

A degradação do material causada por impactos de uma partícula sólida (erodente) suspensa em um líquido é denominada erosão de lama. A degradação causada por lama ocorre em máquinas de fluxo de fluido, principalmente na indústria hidrelétrica, na indústria mineira e na indústria marítima, como por exemplo nas turbinas de hidroelétricas, válvulas, tubulações e hélices marinhas, devido ao fato de que os componentes estão em contato com o líquido e contém partículas duras que acelera a perda de material (GREWAL; AGRAWAL; SINGH, 2013b).

Os principais efeitos da erosão por lama são perdas econômicas resultantes da necessidade de substituir ou regenerar o dispositivo e parar o processo tecnológico. A erosão por lama provoca a perda gradual de massa da camada superficial, altera a geometria dos elementos das instalações e máquinas, o que leva a uma redução na eficiência e vida útil (GREWAL et al., 2014).

Os custos das falhas associadas à erosão por lama são devido a substituições de peças ou regeneração de peças de máquinas corroídas, perda de produtividade e perdas indiretas de energia, se tornando um problema financeiro industrial.

Desde 1946, quando os primeiros trabalhos técnicos sobre o desgaste erosivo foram publicados (FINNIE, 1995), foram realizadas muitas investigações sobre a degradação do material devido a lama. No ano de 1960 (FINNIE, 1960) publicou seu trabalho pioneiro sobre a erosão da lama, em que foram apresentados mecanismos de degradação e análises teóricas para prever danos por erosão.

Muitos pesquisadores tem desenvolvido trabalhos adicionais com considerações teóricas e extensas investigações experimentais, mas a erosão tipo lama ainda permanece como um problema de desgaste não resolvido.

Segundo (BUSZKO; KRELLA, 2017) o número de trabalhos dedicados à erosão de partículas sólidas de tipo lama indica o grau desses problemas. Somente em 2016, em publicações de Elsevier, mais de 700 artigos, que diziam respeito ao fenômeno da erosão tipo lama, foram publicados.

Todos os trabalhos foram desenvolvidos tentando compreender melhor o fenômeno da erosão tipo lama e as correlações entre as propriedades dos materiais e a resistência do material, utilizando vários tipos de equipamentos de teste simulando as diferentes condições.

4.4.4 PRINCIPAIS FATORES RESPONSÁVEIS PELO PROCESSO DE EROSÃO POR LAMA

A degradação dos materiais devido à erosão do tipo lama depende de muitos fatores, que podem ser divididos em três grupos principais: o primeiro ligado a condições de fluxo do fluido (velocidade do fluxo, ângulo de choque de partículas, concentração de partículas, densidade do líquido, atividade química do líquido, temperatura do líquido), o segundo tem a ver com as partículas sólidas (tamanho, forma, dureza, resistência) e o terceiro com o material alvo (propriedades mecânicas e de resistência: tenacidade, fadiga, rendimento e resistência máxima, endurecimento do trabalho, topografia superficial, microestrutura, número e tamanho dos defeitos) (LATHABAI; PENDER, 1995) (GREWAL; AGRAWAL; SINGH, 2013a) (BUSZKO; KRELLA, 2017). Assim, o número de fatores que influenciam a erosão da lama é muito grande e a degradação dos materiais é um efeito sinérgico de todos os fatores mencionados.

Na Figura 4.10 podemos ver um esquema de erosão do tipo lama que é um processo de degradação superficial devido à repetição de impactos de partículas sólidas que fluem com um líquido.

A velocidade do impacto e o tamanho da partícula sólida têm um efeito na energia de impacto cinética de uma única partícula. Com o aumento da velocidade de impacto e do tamanho das partículas, aumenta a taxa de erosão. Efeito semelhante na taxa de erosão tem o aumento da concentração de partículas em um líquido, que influencia a energia total de impacto (BUSZKO; KRELLA, 2017).

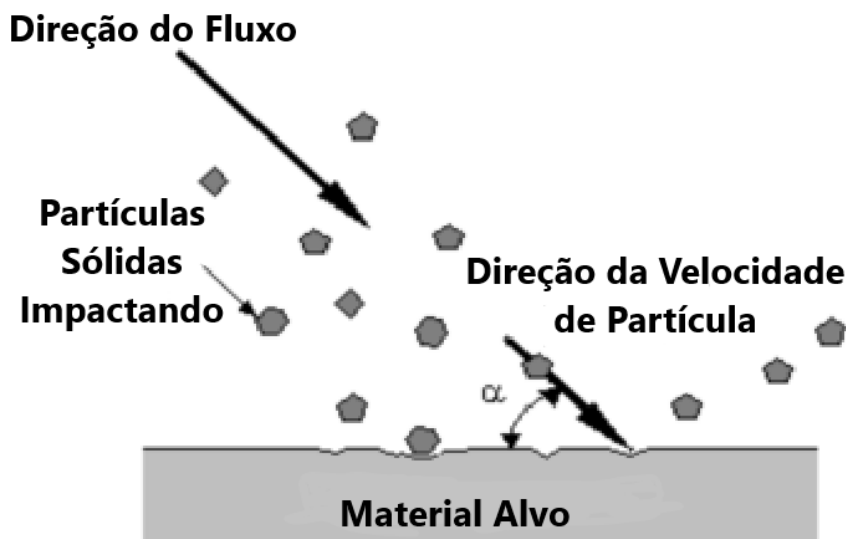


Figura 4.10 – Esquema de erosão por lama (adaptado de (BUSZKO; KRELLA, 2017)).

As forças dinâmicas do fluido que atuam sobre as partículas erodentes devido aos padrões de fluxo sobre o alvo também interferem no ângulo de impacto real. Quando o jato do fluido impacta sobre a superfície plana, o jato se espalhará pela superfície. Na erosão de tipo lama, a direção do erodente será a direção do fluxo devido à grande viscosidade do líquido (ZU; HUTCHINGS; BURSTEIN, 1990).

Segundo (GREWAL; AGRAWAL; SINGH, 2013a) a erosão do tipo lama é classificada, segundo a velocidade do impacto, como em erosão de alta e baixa velocidade. Se a velocidade está entre 6 e 9 m/s, a erosão é classificada como de alta velocidade, enquanto abaixo desta velocidade, a erosão é chamada de erosão de baixa velocidade. A presença de partículas submicrométricas (30 a 150 μm de diâmetro) em um líquido que flui com velocidade acima de 10 m/s é desenvolvida uma erosão sub-sônica (ARORA; OHL; MØRCH, 2004).

O próximo fator chave que tem um enorme impacto neste tipo de erosão é a dureza do material. Com o aumento da dureza do material alvo aumenta o ângulo de impacto crítico, no qual ocorre a taxa máxima de erosão, como mostrado na Figura 4.9 (OKA; OKAMURA; YOSHIDA, 2005) (SHITOLE et al., 2015). No caso de materiais dúcteis, a taxa máxima de erosão ocorre em aproximadamente 30°. No caso de materiais frágeis ou rígidos atingem a taxa máxima de erosão no ângulo de impacto de aproximadamente 90° sob impactos normais. Apesar da dureza do material, a dureza das partículas sólidas influencia a taxa de erosão do material (SHITOLE et al., 2015).

4.4.5 MECANISMOS DE EROÇÃO

Três mecanismos de erosão são muito importantes e frequentemente identificados na remoção de material sob erosão de partículas sólidas, eles são: micro-corte

(dominante para alto ângulo de erosão de materiais dúcteis), micro-arado (dominante para erosão de baixo ângulo de materiais dúcteis) e microfratura (dominante para materiais frágeis) (HUTCHINGS, 1981) (LEVY; YAU, 1984) (BALL, 1986) (FINNIE, 1995).

A teoria da erosão de partículas sólidas pressupõe que, para pequenos ângulos de impacto em aproximadamente 30° , a erosão é devida a um processo de formação de cavacos como resultado da ação do micro-arado das partículas erodentes.

O modo pelo qual as partículas erodentes removem o material de uma superfície de alvo dúctil envolve o deslocamento do material, produzindo crateras. Uma partícula impactante empurra o material para a frente, deixando um sulco no seu rastro e um lábio na extremidade do sulco quando ele sai do local de impacto. Isto é mostrado esquematicamente na Figura 4.11 (a).

Para grandes valores de ângulo de impacto em aproximadamente 90° , o mecanismo de erosão deixa de ser um corte e pode ser descrito como um desgaste de impacto repetido. No caso de materiais dúcteis, a deformação plástica geralmente resulta das partículas que impactam a superfície, como mostrado na Figura 4.11 (c). Quando a energia do impacto excede o limite, em condições de estado estacionário, a camada superficial é fortemente deformada resultando em microfraturas dúcteis.

Para os ângulos de impacto entre 30° e 90° , ambos os mecanismos contribuem para o processo de erosão, como mostrado na Figura 4.11 (b).

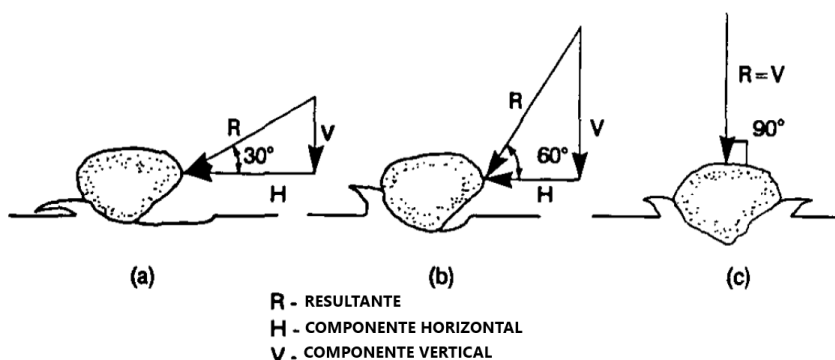


Figura 4.11 – O efeito do ângulo de impacto no modo de remoção de material (adaptado de (BESTER, 1993)).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 5.1 apresenta um fluxograma da parte experimental desenvolvida neste trabalho.

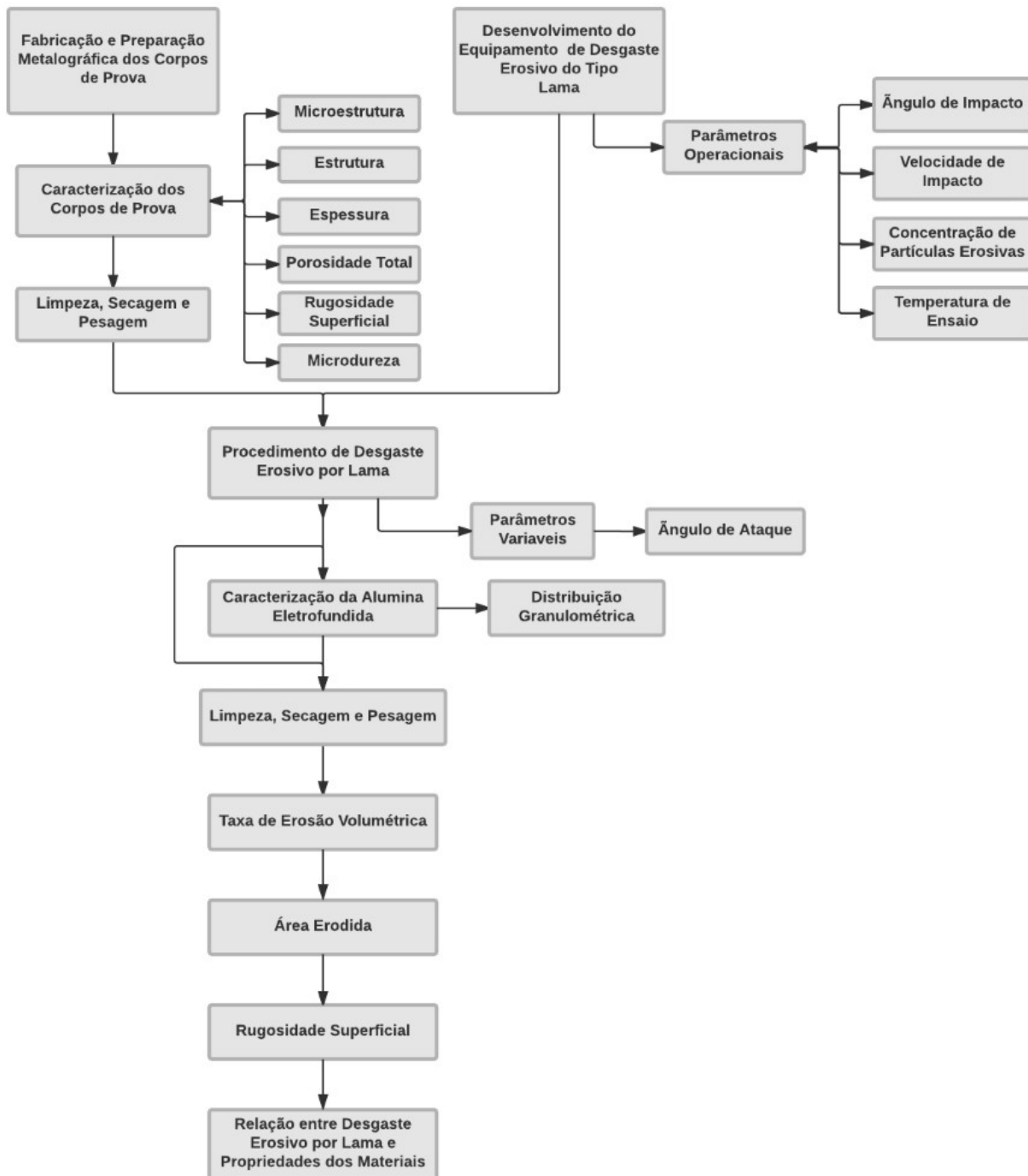


Figura 5.1 – Fluxograma da metodologia utilizada para a realização deste trabalho.

5.1 MATERIAIS

No desenvolvimento deste trabalho, utilizou-se materiais metálicos como o aço Inox martensítico AISI 410 da companhia FEITAL previamente tratado termicamente com têmpera em óleo a uma temperatura patamar de 990°C e com um tempo de 35 minutos. Quanto ao revenimento foi trabalhado a uma temperatura de 520°C. A composição química do aço se mostra na Tabela 1.

A chapa revestida obtida previamente pela técnica de aspersão térmica HVOF de carbeto de Tungstênio (86WC-10Co4Cr) Woka 3653 da companhia Oerlikon Metco com composição química do pó se mostra na Tabela 2. Os parâmetros da aspersão se mostram na tabela 3.

O elastômero PUR comercial MetaLine 785 revestido manualmente com as características mostradas na Tabela 4. Como abrasivo erodente foi usada alumina eletrofundida ALO marrom da companhia Treibacher, com composição química que se mostra na tabela 5. Devido à presença frequentemente de TiO_2 , esta fornece maior resistência ao impacto do que a alumina branca. Esta alumina é fabricada pelo processo Bayer e a eletrofusão do óxido em forno elétrico tipo "Higgins", no qual é produzido um bloco que após o resfriamento adequado, é então cominuído, definindo a distribuição de tamanho e a morfologia dos grãos. Apresenta uma dureza típica entre 1720 HV e 2140 HV. (<https://4346-br.all.biz/alumina-alo-marrom-g12420>), disponível em 26/05/2017).

A alumina eletrofundida marrom apresenta elevada densificação, dureza e resistência mecânica, apropriada para o uso como abrasivo e erodente. Tem como matéria-prima principal a bauxita calcinada que, em mistura com coque de petróleo, ilmenita e cavaco de ferro, sofre um processo de fusão em fornos elétricos especiais. (http://www.abceram.org.br/asp/abc_54.asp), disponível em 29-05- 2017).

Tabela 1 – Composição química do aço Inox martensítico AISI 410 estudado neste trabalho (wt.%)

Elementos	C	Cr	Mn	Si	Ni	P	S	N
Composição (%)	0,019	11,2	0,59	0,72	0,35	0,022	0,002	0,021

Tabela 2 – Composição química do 86WC-10Co4Cr comercial (Woka 3653) estudado neste trabalho (wt.%)

Elementos	W	Co	Cr	C (total)	Fe (max)
Composição (%)	Balance	8,5 – 11,5	3,4 – 4,6	4,8 – 5,6	0,2

Tabela 3 – Parâmetros de deposição do equipamento de HVOF.

Parâmetros	Valores
Vazão de propileno (l/h)	4620
Fluxo de oxigênio (l/h)	15180
Taxa de alimentação (g/min)	42
Distância de deposição (mm)	230

Tabela 4 – Propriedades características do elastômero de poliuretano (PUR) comercial MetaLine 785 estudado neste trabalho.

ρ (g/cm^3)	H ($ShoreA$)	σ_{at} $\varepsilon = 100\%$ (MPa)	σ_u (MPa)	Eu (%)	τ_R (kN/m)	RR (%)	K $W/K \cdot m$
1,05	85	7	20	380	55	45	0,2

Tabela 5 – Composição química da alumina eletrofundida ALO marrom da companhia Treibacher, utilizada como erodente neste trabalho (wt.%)

Elementos	O	Al	C	Ca	Ti	F	Fe	Na	Si
Composição (%)	41,7	21,8	11,8	9,9	8,3	3,1	2,3	-	-

A distribuição granulométrica da alumina eletrofundida ALO marrom, foi avaliada com um granulômetro a Laser, marca Cilas, modelo 1180. A faixa de detecção deste equipamento situa-se entre 0,04 a 2500 μm . A amostra analisada por esta técnica foi dispersa em água e submetida à agitação por ultrassom durante 60 segundos para desaglomeração.

A Figura 5.2 e a Tabela 6 apresentam dados da distribuição granulométrica por difração a laser da alumina eletrofundida utilizada neste trabalho como erodente. Pode-se observar também através da análise da Figura 5.2 uma distribuição unimodal das partículas, com tamanho médio de aproximadamente 98,55 μm .

Tabela 6 – Análise granulométrica por difração a laser da alumina eletrofundida utilizada como erodente neste trabalho.

Matéria-prima	D_{10} (μm)	D_{50} (μm)	D_{90} (μm)	$D_{médio}$ (μm)
Alumina eletrofundida	45,26	95,79	156,98	98,55

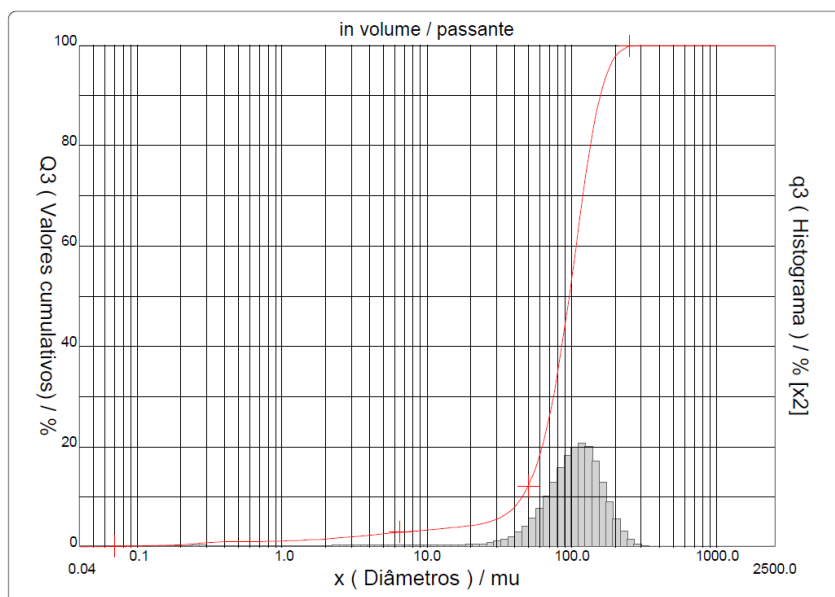


Figura 5.2 – Distribuição granulométrica por difração a laser da alumina eletrofundida. O tamanho médio de grão é de 98,55 μm .

A Figura 5.3 apresenta a morfologia da alumina eletrofundida utilizada como erodente neste trabalho. A partir da análise desta figura observa-se que o erodente é constituído de partículas irregulares, angulares com uma variação no tamanho, isto é uma distribuição de tamanhos.

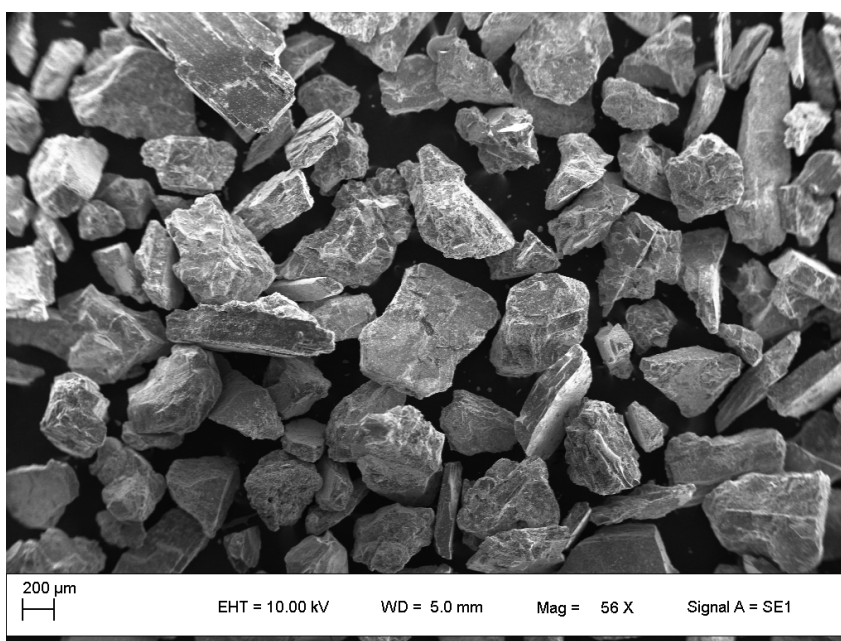


Figura 5.3 – Morfologia da alumina eletrofundida marrom utilizada como erodente. Aumento de 56x

5.2 MÉTODOS

5.2.1 FABRICAÇÃO E PREPARAÇÃO METALOGRÁFICA DOS CORPOS DE PROVA

A fabricação dos corpos-de-prova para o ensaio de erosão começou com os cortes das chapas dos materiais metálicos. Estas foram cortadas em formato cilíndrico com 30 mm de diâmetro e 10 mm de altura, mediante uma cortadora de precisão de jato de água, marca JET TEK no LAMEF (Laboratório de Metalurgia Física) da UFRGS, não sendo necessário acabamento adicional. O processo não origina distorções no material de origem mecânica e térmica (pois não existe aquecimento), o que assegura um corte limpo, e no caso das chapas revestidas por aspersão térmica, sem desprendimento dele, como se amostam nas Figuras 5.4 e 5.5.

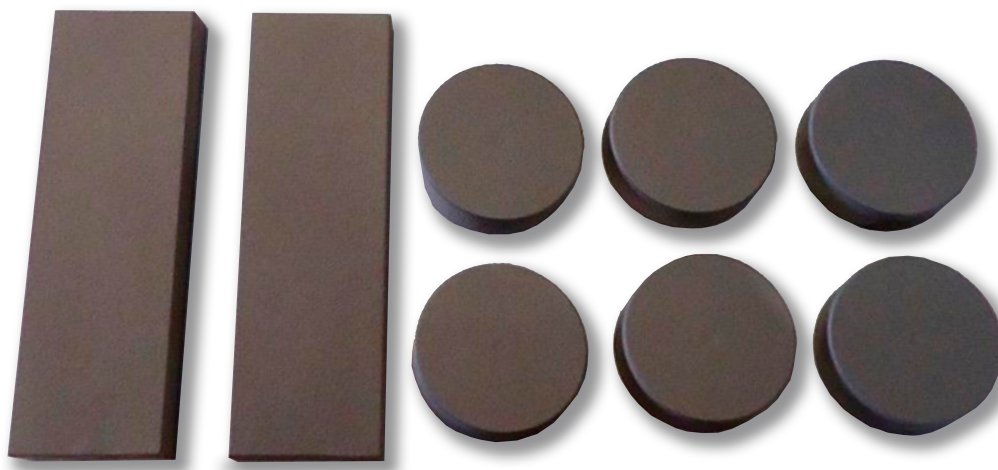


Figura 5.4 – Corpos-de-prova de aço inoxidável AISI 410 na forma de cilindro com 30 mm de diâmetro e 10 mm de altura.

Para o caso da fabricação dos corpos-de-prova poliméricos e da preparação do substrato, essa foi feita visando melhorar a adesão do revestimento PUR no material base com as recomendações fornecidas pelo fabricante e envolveu a seguinte sequência de etapas: primeiramente com a limpeza e descontaminação das peças com limpador de superfícies, e posteriormente foi aplicado um impermeabilizante da mesma companhia com nome comercial MetaLine 924 (coloração vermelha) como se mostra na Figura 5.6. Esta camada segundo o fabricante, fornece ao material uma proteção contra corrosão, eletroquimicamente ativa, evita a infiltração dos cantos de revestimento e protege contra a ferrugem subsuperficial quando existem danos parciais.

Depois de um tempo de 5 minutos e à temperatura ambiente (20°C) as amostras ficaram prontas para a aplicação do fixador MetaLine 900 Primário Universal (incolor)



Figura 5.5 – Corpos-de-prova do revestimento 86WC-10Co4Cr (Woka 3653) aspergido termicamente na forma de cilindro com 30 mm de diâmetro e 10 mm de altura.

como se amostra na Figura 5.7. Finalmente depois do mesmo tempo e temperatura, é aplicado de igual maneira de forma manual o revestimento PUR comercial MetaLine 785 ficando como se mostra na Figura 5.8.

(<http://www.metaline.de/ext/download.php?2ca66b9f4bd57165d9708cca547c8d1c=K-700_Presentation_PT.pdf>, disponível em 01-06-2017).



Figura 5.6 – Corpos-de-prova com aplicação do primer impermeabilizante MetaLine 924 (coloração vermelha).

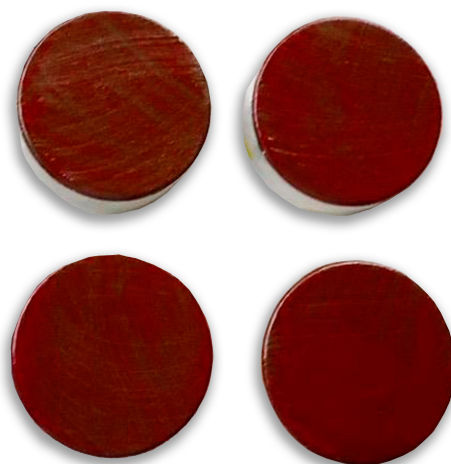


Figura 5.7 – Corpos-de-prova com aplicação do Universal MetaLine 900 (incolor).



Figura 5.8 – Corpos-de-prova com o revestimento elastomérico MetaLine 785.

5.2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

5.2.2.1 Análise Qualitativa de Fases por Difração de Raios-X (DRX)

A análise por Difração de Raios-X (DRX) teve como objetivo a caracterização qualitativa do revestimento. Nesta análise, o objetivo foi a identificação das fases cristalinas presentes no revestimento como WC, W_2C e W, observando principalmente se houve formação de fases entre (WC, C, W, e Co) produto da aspersão por HVOF. As análises foram realizadas utilizando um difratômetro de raios X marca PHILIPS (modelo X'Pert MPD), equipado com um monocromador de grafite, radiação $Cu-K\alpha$ ($\lambda = 1,5406$) e ânodo fixo operado a 40 kV e 40 mA. A Tabela 7 apresenta os parâmetros selecionados para as análises de fases.

Tabela 7 – Parâmetros das análises de DRX.

Parâmetro	Análise de fases
$\Delta 2\theta$	5-75°
<i>Passo</i>	0,05
<i>Tempo por passo (s)</i>	1
<i>Fendas</i>	$\frac{1}{2}$

5.2.2.2 Análise Térmica - Determinação da Perda ao Fogo (LOI)

Este método de ensaio da análise térmica de determinação da perda ao Fogo (LOI) teve como objetivo a decomposição e eliminação de materiais orgânicos presentes no revestimento PUR comercial MetaLine 785 por combustão, a fim de conhecer a porcentagem dos possíveis reforços inorgânicos presentes no revestimento que fornecem a melhoria nas propriedades da resistência ao desgaste. Após a remoção e o aquecimento de uma pequena amostra do revestimento em um forno industrial (equipamento: SANCHIS, modelo BTT) em atmosfera de ar a uma temperatura de 1000°C com patamar de 10 minutos, determinou-se a perda de massa da amostra de teste quando aquecida em condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera, massa de amostra e especificações do equipamento, de acordo com a norma ASTM D7348-13 ([STANDARD, c](#)).

5.2.2.3 Análise Microestrutural - Microscopia Óptica (M.O) - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com Microsonda Acoplada (EDS)

O objetivo de este procedimento foi realizar antes do ensaio de desgaste erosivo por lama, uma análise microestrutural dos materiais e composicional do revestimento 86WC-10Co4Cr obtido por HVOF, identificando os fenômenos que ocorrem e concorrem na resistência ao desgaste do sistema utilizado, com ajuda das imagens obtidas mediante microscopia Óptica (M.O) (equipamento: LEICA DM2700 M), microscopia eletrônica de varredura (MEV) (equipamento: EVO, modelo MA10) com microsonda EDS acoplada (equipamento: SHIMADZU, modelo SSX-550) do LAMEF (Laboratório de Metalurgia Física) da UFRGS.

5.2.2.4 Espessura

Para realizar a medida da espessura dos revestimentos, fez-se o uso da microscopia óptica (M.O) através de um microscópio Olympus BXS1M e uma câmera acoplada Infinity1. A partir das micrografias de seções transversais, utilizou-se o programa Image J (software gratuito para download) para determinar a espessura de cada revestimento. Assim, um padrão de comprimento foi gerado a partir da barra de comprimento existente na micrografia. Foram realizadas entre 100 e 200 medidas em

peças distintas para que se pudesse obter uma média aritmética simples.

(<<http://imagej.nih.gov/ij/download.html>>, disponível em 01-06-2017).

5.2.2.5 Porosidade Total

Os revestimentos aspergidos foram caracterizados quanto à porosidade total através da análise por imagem. Para a determinação da porosidade total dos revestimentos, os corpos-de-prova foram previamente preparados para a análise MEV, isto é, cortados transversalmente, lixados e polidos. Após, foram feitas micrografias óticas em um microscópio eletrônico de varredura (equipamento: EVO, modelo MA10). A partir destas micrografias, utilizou-se o programa ImageJ para determinar a proporção de áreas escuras (poros + óxidos) e área clara (revestimento). Por este método não foi possível separar a contribuição dos óxidos na porosidade medida. Foram feitas três análises do revestimento em corpos de prova distintos e a partir destas determinou-se a média da porosidade total conforme a norma ASTM E2109-01 (STANDARD, d).

(<<http://imagej.nih.gov/ij/download.html>>, disponível em 01-06-2017).

A eficácia deste método para revestimentos aplicados por aspersão térmica foi abordada por (DESHPANDE et al., 2004), comparando métodos convencionais, como a absorção de água, porosimetria de mercúrio e picnometria de hélio, e métodos avançados como dispersão de nêutrons em pequenos ângulos. A partir da comparação dos resultados pelas diferentes técnicas, os autores puderam validar a técnica de análise da porosidade por imagem.

Os revestimentos poliméricos foram caracterizados quanto à porosidade através da análise por imagem. Os corpos-de-prova foram previamente preparados para a análise MEV, cortados transversalmente. Após, foram feitas micrografias óticas em um microscópio eletrônico de varredura (equipamento: EVO, modelo MA10). A partir destas micrografias e devido à sua baixa porosidade, não utilizou-se o programa ImageJ para determinar a proporção de áreas escuras (poros) e área clara (revestimento).

5.2.2.6 Rugosidade Superficial

A rugosidade superficial dos revestimentos foi determinada a partir do parâmetro Ra - rugosidade média, o qual consiste na média aritmética dos valores absolutos das distâncias desde a linha média ao perfil. Na medição foi usado um equipamento de contato da marca Mitutoyo modelo SJ-400. Para cada revestimento efetuou-se a medição do Ra antes do desgaste e após o desgaste erosivo, junto à região desgastada. Em cada amostra procedeu-se a medição por três vezes. Se algum valor lido no equipamento foi muito diferente dos demais, repete-se a medição por mais uma vez. A partir dos valores lidos fez-se a média da rugosidade média.

5.2.2.7 Microdureza

As medidas de microdureza foram feitas na escala Vickers de acordo com a norma ASTM E- 384-11 utilizando-se uma carga de 0,3 KgF e um tempo de indentação de 30s. Para as medidas utilizou-se um microdurômetro Micromet 2001 da marca Buehler. A dureza obtida foi uma média de 10 pontos feitos ao longo do corte transversal no revestimento metálico e no aço.

5.2.3 DESGASTE EROSIVO POR LAMA

O equipamento utilizado para os ensaios de desgaste erosivo foi desenvolvido no Laboratório de Materiais Cerâmicos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Este aparato experimental está baseado nos trabalhos de (LEVY; YAU, 1984), (ZU; HUTCHINGS; BURSTEIN, 1990), (WENTZEL; ALLEN, 1997), (SANTA; BAENA; TORO, 2007) e (SANTA et al., 2009). O desenvolvimento deste equipamento foi uma etapa de grande importância para este trabalho, pois, conforme consta na literatura, o aparato experimental que simula a erosão por lama influencia diretamente nos resultados obtidos. Design do protótipo é mostrado na Figura A.1 do Apêndice A.

Para os ensaios de desgaste erosivo foi adaptada uma lavadora de alta pressão comercial (equipamento: Electrolux, modelo UWS10) e adaptado no bico da pistola um sistema de alimentação de partículas erodentes, utilizando no interior um dispositivo Venturi-acelerador de partículas, apresentado na Figura 5.9, dentro de uma câmara de ensaios.

Este equipamento permite controlar o ângulo de impacto, a velocidade do impacto, concentração de partículas erosivas na suspensão e temperatura de ensaio. (<<http://loja.electrolux.com.br/lavadora-de-alta-pressao-ultra-wash-uws10-electrolux/p>>, disponível em 03/10/2017).

O ensaio foi realizado utilizando H₂O em temperatura ambiente com 960 gr de massa de erodente de alumina eletrofundida ALO marrom da companhia Treibacher. As amostras foram colocadas na saída do equipamento para garantir a incidência do fluido de impacto e velocidade média do material erosivo em suspensão de 77 m/s. Essa velocidade calculou-se usando medições de vazão, tempo e área do bico da saída do fluxo de acordo com a Equação (5.1).



Figura 5.9 – Pistola usada para os ensaios de desgaste erosivo tipo lama e o acessório adaptado no bico com o sistema de alimentação de partículas erodentes utilizando no interior um dispositivo Venturi-acelerador de partículas. Design do acessório e dispositivo Venturi-acelerador de partículas mostrado nas Figuras B.1, B.2, B.3 e B.4 do Apêndice B.

$$Q = Av \quad (5.1)$$

Onde:

Q = Vazão, $0,365 \text{ m}^3/\text{min}$;

A = Área do bico da saída do fluxo para diâmetro de $0,001 \text{ m}$, em (m^2) ;

v = Velocidade média do material erosivo em suspensão, em (m/s) .

Os ângulos de incidência avaliados foram de 30° e 90° entre o eixo de simetria do fluxo do fluido e a superfície das amostras. Em todos os casos, a concentração de partículas na mistura foi de 7% em peso. Esses ângulos foram escolhidos por serem os mais empregados nesses tipos de ensaios, uma vez que materiais metálicos e poliméricos possuem maior desgaste em ângulos de 30° e materiais cerâmicos em 90° devido ao mecanismo de remoção do material que age de forma diferente para esses materiais (HUTCHINGS, 1981) (FINNIE, 1995) (BARKOULA; KARGER-KOCSIS, 2002). Na Figura 5.10 é apresentado um esquema completo, com os parâmetros usados durante o ensaio de desgaste erosivo por lama.

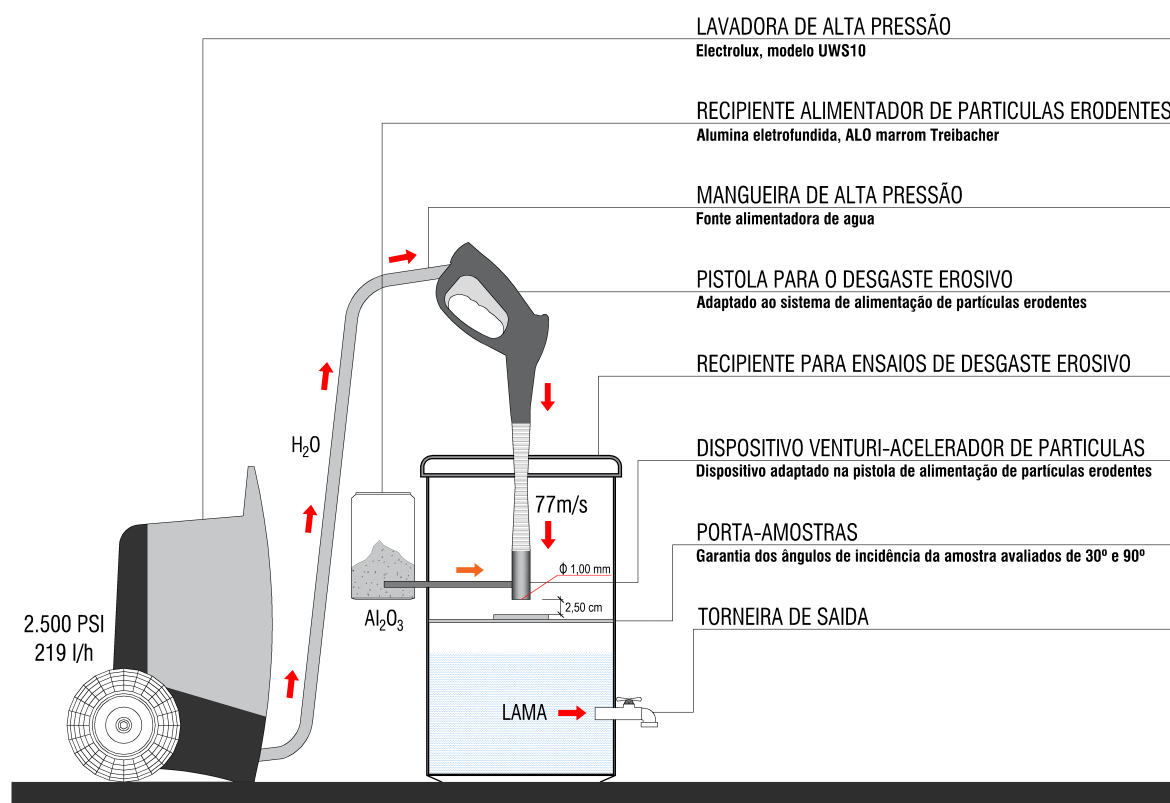


Figura 5.10 – Esquema com os parâmetros usados durante o ensaio de desgaste erosivo por lama.

A resistência à erosão foi determinada a partir dos resultados da perda de volume das amostras. As perdas de massa foram medidas com intervalo de 1 minuto, usando uma balança analítica Mettler Toledo 210G, com precisão de 0,0005g, com uma duração total de cada ensaio de 4 minutos.

O abastecimento do fluido transportador neste caso da água, é pressurizada por meio da lavadora até a pistola com o bico na qual tem a adaptação do dispositivo Venturi-acelerador de partículas que constitui um único corpo, onde garante uma queda de pressão no fluido, resultando em um vácuo suficientemente forte para tirar partículas erodentes através de um tubo de sucção horizontal. A parte inferior deste tubo de sucção é colocado no recipiente de erodente de alumina eletrofundida. O fluido erodente é transportado e misturado no ejetor, fazendo com que um jato homogêneo e sem zonas mortas da lama seja acelerado através do bico de saída na superfície da amostra. O corpo de prova é mantido em um porta-amostras de alumínio que pode ser girado no eixo horizontal para qualquer ângulo de impacto predefinido, neste caso 30° e 90°.

O espécime e o suporte completo estão encerrados em uma câmara fechada para ensaios.

Na Figura 5.11 é apresentado um esquema do equipamento para ensaios de desgaste erosivo por lama em funcionamento.

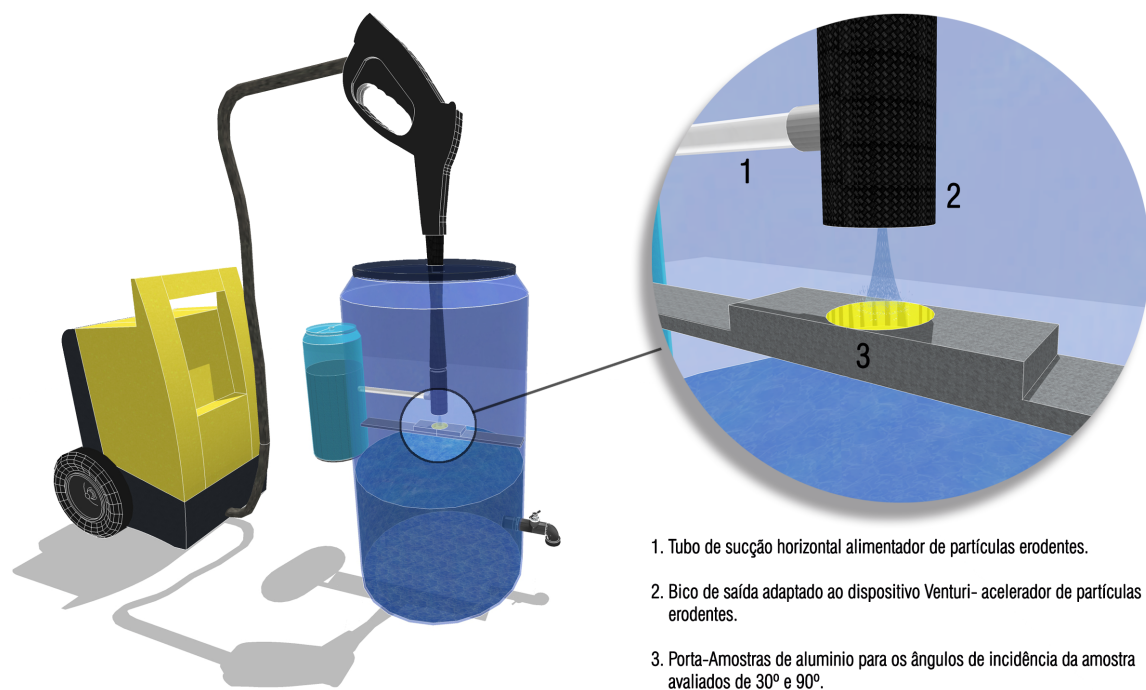


Figura 5.11 – Equipamento para ensaios de desgaste erosivo por lama em funcionamento indicando as partes principais do ensaio: (1) tubo de sucção horizontal alimentador de partículas erodentes, (2) bico de saída adaptado ao dispositivo Venturi-acelerador de partículas erodentes; (3) Porta-amostras de alumínio para os ângulos de incidência da amostra avaliados de 30° e 90°.

Os corpos-de-prova foram limpos sendo mergulhados em água deionizada e colocados em um ultrassom por 10 minutos. Em seguida, a superfície foi limpa com álcool e o corpo-de-prova foi colocado em estufa por 20 minutos a 50 °C. Após a retirada da estufa, a peça foi resfriada à temperatura ambiente, pesada na balança analítica (imediatamente antes do ensaio) e colocada no porta-amostras. O fluxo de água-erodente foi aberto e iniciou-se o ensaio. O ensaio foi finalizado após o tempo determinado e com a utilização de massa de erodente aproximada por ensaio de 960 g. Retirou-se a amostra da câmara de ensaios e a mesma sequência de limpeza e pesagem da peça foi realizada.

A taxa de erosão ou desgaste foi determinada pela perda de volume por unidade de tempo, a partir da diferença da perda de massa, considerando a relação da densidade aparente dos diferentes materiais investigados (aço Inox martensítico AISI 410 = 7,73

g/cm^3 , carbeto de Tungstênio 86WC-10Co4Cr = $12,5 g/cm^3$, elastômero PUR comercial MetaLine 785 = $1,05 g/cm^3$, de acordo com a Equação (5.2).

As taxas de desgaste não são apresentadas como espessura por unidade de tempo porque o desgaste não foi uniforme em relação à superfície de desgaste (MADSEN, 1988).

$$T_{volume} = \frac{(m_i - m_f)}{\rho_{ap} \times m_e} \quad (5.2)$$

Onde:

T_{volume} = Taxa de erosão volumétrica, em ($cm^3_{alvo}/g_{erodente}$)

m_i = Massa inicial da amostra, em (g);

m_f = Massa final da amostra, em (g);

ρ_{ap} = Densidade aparente do revestimento, em (g/cm^3);

m_e = Massa de erodente utilizada, em (g).

5.2.4 DETERMINAÇÃO DA ÁREA ERODIDA

Com o auxílio de uma lupa Olympus modelo SZ61 e da câmera Infinity1, fez-se a aquisição de imagens para que posteriormente com o programa ImageJ fosse possível ter estimada uma média da área desgastada pelo erodente. Realizou-se medidas em 3 amostras para cada material e para os ângulos de incidência avaliados de 30° e 90° . Tais medidas se fizeram necessárias uma vez que a área de colisão modifica muito em função do ângulo empregado.

(<<http://imagej.nih.gov/ij/download.html>>, disponível em 01-06-2017).

5.2.5 DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE ERODIDA

Mediante um Scanner 3D, marca Tecnodrill, modelo Digimill 3D, composto de um cabeçote emissor de laser pontual de digitalização modelo ConoProbe 1.000, marca Optimet, instalado nas dependências do LdSM (Laboratório de Design e Seleção de Materiais) da UFRGS, fez-se a aquisição da digitalização tridimensional das amostras erodidas com a nuvem de pontos obtida, para que posteriormente com o programa Geomagic Studio fosse possível ter estimada uma média da profundidade desgastada pelo erodente. Realizou-se medidas em 3 amostras para cada material e para os ângulos de incidência avaliados de 30° e 90° . Tais medidas se fizeram necessárias uma vez que a profundidade de erosão se modifica muito em função do ângulo empregado (YILDIZLI; KARAMIŞ; NAIR, 2006) (OKONKWO et al., 2016).

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

6.1.0.1 Análise Qualitativa de Fases por Difração de Raios-X (DRX)

A Figura 6.1 apresenta o difratograma de raios X do revestimento 86WC-10Co4Cr (Woka 3653) obtido por HVOF. As fases WC (JCPDS 00-051-0939), W (JCPDS 01-089-2767) e Co (JCPDS 00-001-1259) podem ser identificadas. Pode-se observar que o WC presente no pó inicial é predominante no espectro. É possível verificar também a presença de W e de Co como fases secundárias, formadas durante o processo de aspersão térmica pela descarburização das partículas de WC (CHIVAVIBUL et al., 2011) (GUILMANY et al., 1999).

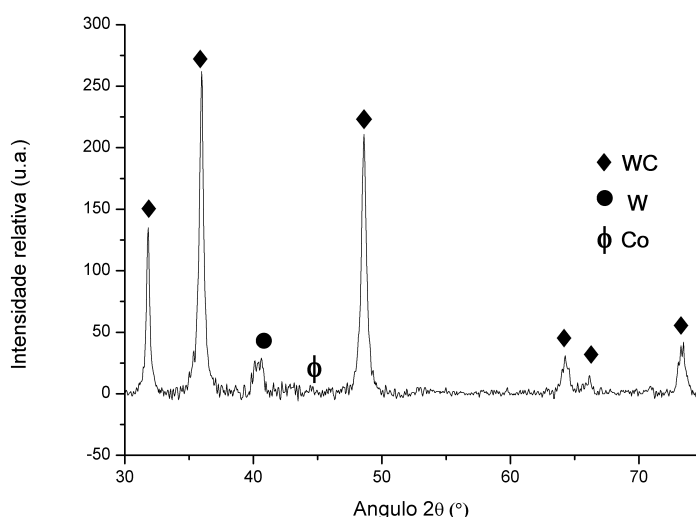


Figura 6.1 – Difratograma de raios X do revestimento 86WC-10Co4Cr obtido por HVOF.

6.1.0.2 Análise Térmica - Determinação da Perda ao Fogo (LOI)

A análise térmica de perda ao fogo ou ignição (LOI) foi determinada medindo a perda de massa em um único procedimento no qual foram pesados 0,6297 g da amostra à temperatura ambiente (30°C) e levada a amostra para o forno industrial em atmosfera de ar a uma temperatura de 1000°C com patamar de 10 minutos. Depois de resfriar o forno pelo tempo de um dia, foi retirada a amostra do revestimento no cadinho e levada ao dessecador durante uma hora, para depois ser novamente pesada,

obtendo um resultado de 0,0115 g de massa como possível resíduo inorgânico depois da ignição.

O resultado da análise térmica (LOI) do revestimento PUR comercial MetaLine 785 obtido a partir da Equação (6.1) representado em porcentagem foi de 98,17% de perda de massa e eliminação de materiais orgânicos presentes no revestimento na decomposição, pelo que significa que o resíduo do revestimento de possíveis materiais inorgânicos representado em porcentagem corresponde a 1,83%.

$$LOI = \frac{W - B}{W} \times 100 \quad (6.1)$$

Onde:

LOI = Perda ao fogo ou ignição, em %;

W = Massa da amostra, em (g);

B = Massa da amostra depois ignição a 1000°C, em (g).

Segundo (GOLDBERG; LAUMAN, 1989) os materiais inorgânicos que possivelmente podem estar presentes no revestimento PUR comercial MetaLine 785 usado durante a pesquisa, e que comumente são utilizados para reforços em revestimentos poliméricos a fim de melhorar sua resistência ao desgaste e garantir a maior proteção possível, são os materiais metálicos e cerâmicos. Os compósitos de polímeros são frequentemente usados como componentes estruturais onde ocorre desgaste erosivo (BAGHERI; PEARSON, 1996) (BAGHERI; MAROUF; PEARSON, 2009).

6.1.0.3 Análise Microestrutural - Microscopia Óptica (M.O) - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com Microsonda Acoplada (EDS)

A observação metalográfica superficial do aço inoxidável AISI 410 por meio da microscopia óptica (M.O) e microscopia eletrônica de Varredura (MEV) reportou uma microestrutura martensítica com seus contornos de grão e alguns carbonetos precipitados, típica de tratamentos térmicos de têmpera e revenimento, como é possível observar na Figura 6.2 (LÓPEZ; TSCHIPTSCHIN; FALLEIROS, 2009).

A Figura 6.3 mostra a micrografia do revestimento 86WC-10Co4Cr obtido por aspersão térmica HVOF. Esta apresenta baixa quantidade de óxidos, com forma contínua e homogênea microestruturalmente, com baixa presença de trincas e buracos. Não é possível distinguir lamelas. Isso pode ser explicado pela fusão das partículas de WC-Co-Cr, o que induz no material aspergido uma melhor distribuição (CASTRO et al., 2001).

Geralmente a matriz de aglutinante de Co-Cr exibe diferentes tons de cor cinza, como se pode ver na Figura 6.3, para os revestimentos obtidos pela mesma técnica de HVOF (GOYAL et al., 2012).

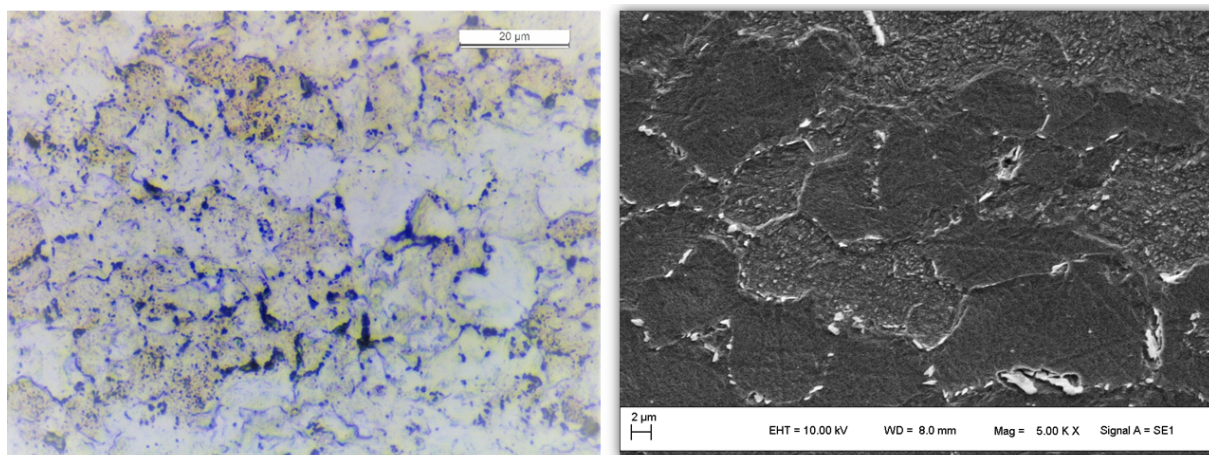


Figura 6.2 – Microestrutura martensítica do aço inoxidável AISI 410 temperado e revenido. (MO, 1000 x, MEV 5000 x, Ataque: Villela)

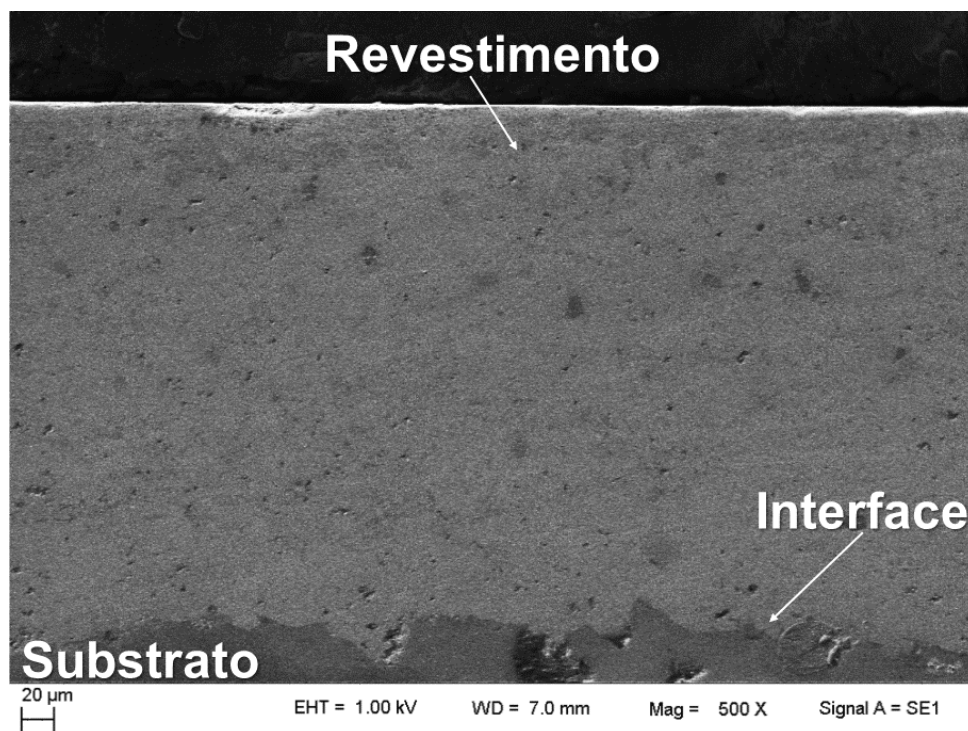


Figura 6.3 – Imagem por MEV da microestrutura do revestimento 86WC-10Co4Cr obtido por HVOF. Ampliação de 500x.

A Figura 6.4 mostra a região da microanálise elementar na seção transversal do revestimento 86WC-10Co4Cr obtido por HVOF, utilizando o sistema EDS, a qual prova a presença de W, Co, Cr e C nas amostras como vemos nos espectros quantitativos da Figura 6.5, o que está de acordo com o resultado obtido por difração de raios X da Figura 6.1. Os resultados alcançados foram similares aos obtidos por (THAKUR et al., 2011) para revestimentos com igual composição e técnica.

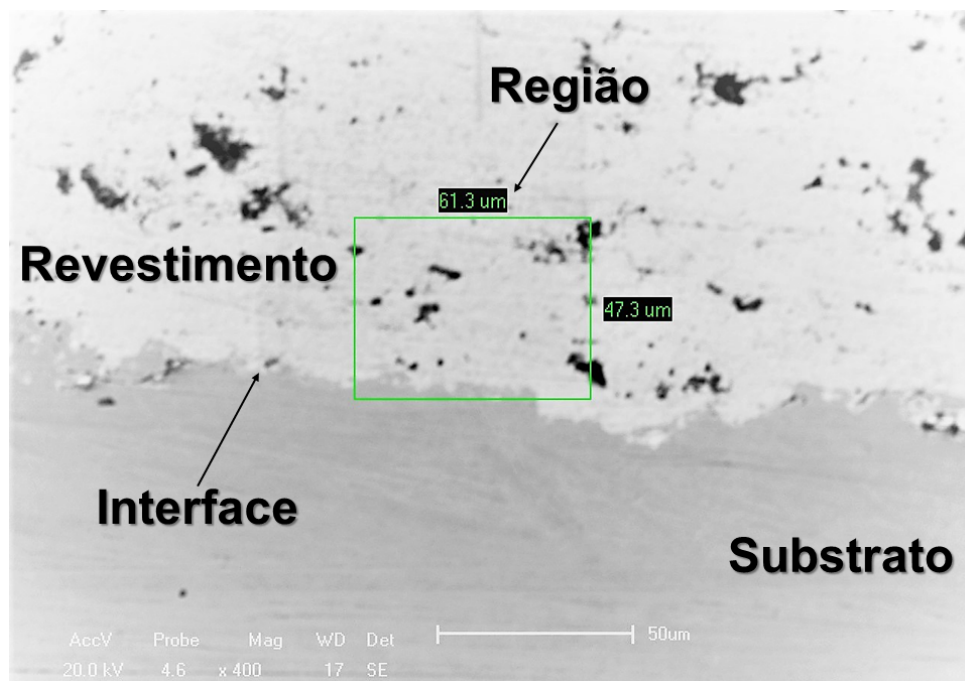


Figura 6.4 – Imagem por MEV da região do microanálise elemental na seção transversal do revestimento 86WC-10Co4Cr (Woka 3653) obtido por HVOF utilizando o sistema EDS. Ampliação de 400x.

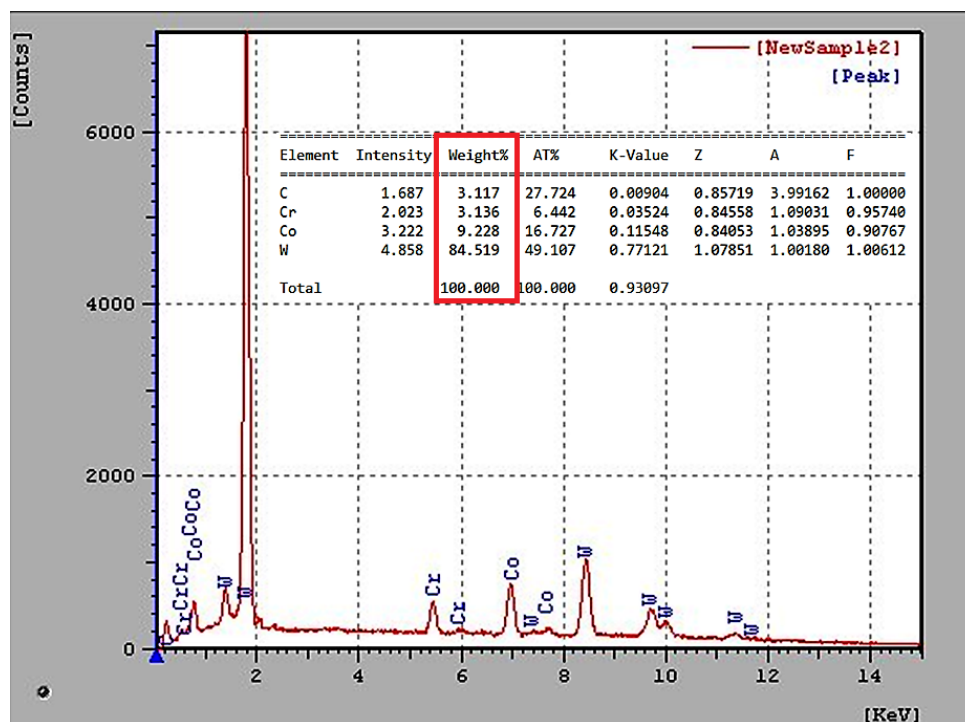


Figura 6.5 – Imagem do espectros quantitativos da região da microanálise elemental na seção transversal do revestimento 86WC-10Co4Cr obtido por HVOF utilizando o sistema EDS.

A Figura 6.6 mostra a micrografia na seção transversal do revestimento elastomérico PUR comercial obtido manualmente. É possível diferenciar a camada do revestimento, impermeabilizante e o substrato. O revestimento na sua totalidade mostra uma camada com forma e microestruturalmente coesiva, sem trincas e baixa presença de buracos. Isso pode ser explicado pelos métodos da aplicação e cura sem a presença de solventes, que normalmente podem gerar poros na superfície do material, e consequentemente núcleos de crescimento para fissuras, o que levaria a uma maior taxa de perda do material.

Normalmente estes revestimentos, além de resinas, reforços e solventes, comumente possuem uma série de aditivos que tem funções específicas em termos reológicos, cor, processo de cura, entre outros. Esses aditivos em muitos casos são difíceis de reconhecer e sua presença não é explicitamente relatada pelo fabricante devido a questões de sigilo comercial (BAGHERI; MAROUF; PEARSON, 2009).

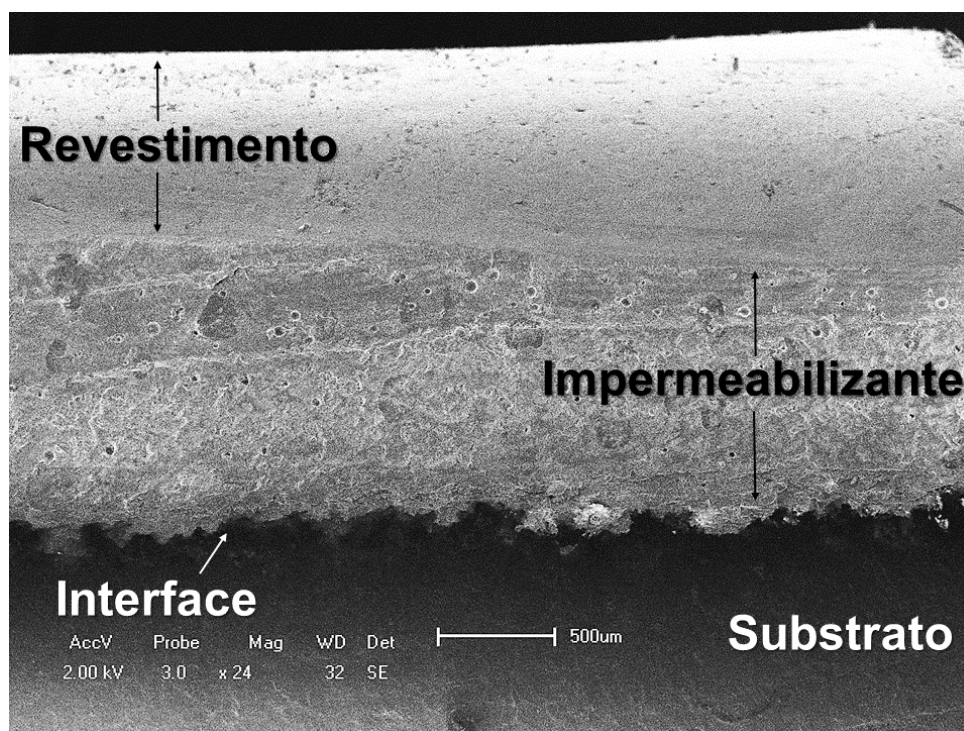


Figura 6.6 – Imagem por MEV na seção transversal do revestimento elastomérico PUR comercial obtido manualmente. Ampliação de 24x.

6.1.0.4 Espessura

A Tabela 8 mostra a medida da espessura média dos revestimentos de 86WC-10Co4Cr obtido por HVOF e do revestimento PUR comercial MetaLine 785, fazendo uso das micrografias de seções transversais processadas no programa Image J. Foram realizadas entre 100 e 200 medidas em peças distintas para que se pudesse obter uma média aritmética simples como se mostra nas Figuras 6.7 e 6.8.

A Tabela 8 apresenta a espessura média para o revestimento 86WC-10Co4Cr obtido por HVOF.

Tabela 8 – Resultado da medida de espessura média do revestimento 86WC-10Co4Cr.

Revestimento	Espessura média (μm)	Desvio padrão
86WC-10Co4Cr	227	20
PUR	1091	138

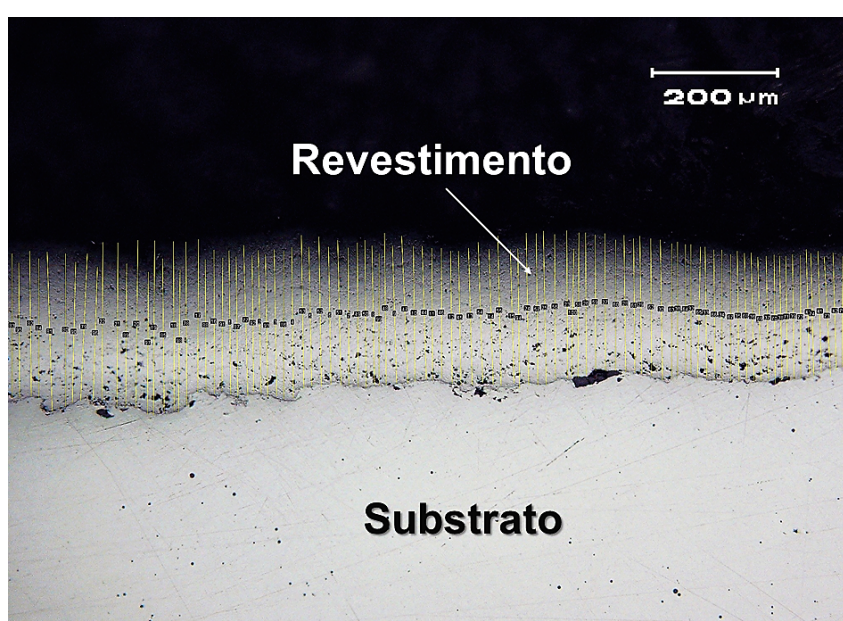


Figura 6.7 – Micrografia óptica (M.O) da seção transversal do revestimento 86WC-10Co4Cr obtido por HVOF e processada sua espessura média no programa Image J. Ampliação de 100x.

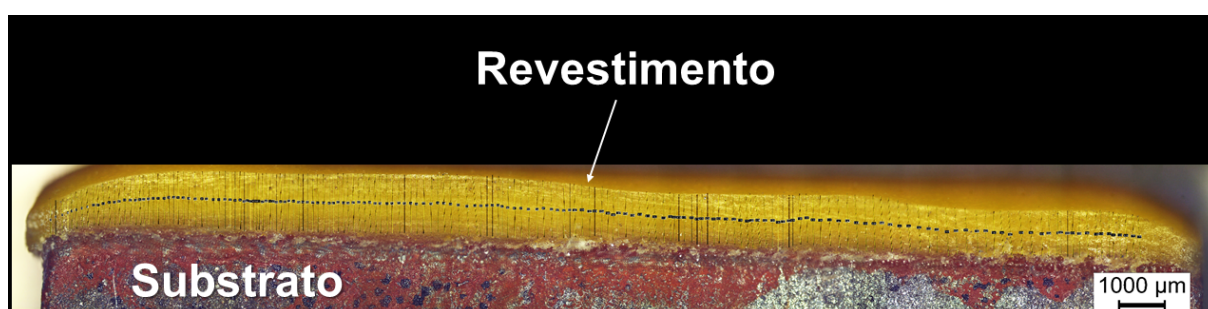


Figura 6.8 – Micrografia óptica (M.O) da seção transversal do revestimento PUR comercial MetaLine 785 e processada sua espessura média no programa Image J. Ampliação de 50x.

6.1.0.5 Porosidade Total

A Figura 6.9 evidencia o contraste de cores claras (revestimento) e escuras (poros) obtido pelo software ImageJ. Após a análise de 3 amostras do revestimento 86WC-10Co4Cr, a porosidade média foi quantificada de 0,7%, de acordo com a norma ASTM E2109-01 (STANDARD, d). (KUMAR et al., 2016) obtiveram porosidade de 0,98% para um revestimento de 86WC-10Co4Cr obtido por HVOF e (THAKUR et al., 2011) compararam dois revestimentos de WC-Co-Cr com um tamanho do grão diferente dos carbeto (entre 200 e 500 nm e outro de aproximadamente 100 nm) os quais foram aspergidos igualmente pela técnica de HVOF obtendo porosidades de 0,75% e 0,57%, respectivamente. De igual maneira (GUAGLIANONI, 2015) obtiveram porosidades de 0,5 e 1% em revestimentos de WC-Co-Cr obtidos por HVOF.

Logo, o valor da porosidade obtido está dentro de valores apresentados pela literatura consultada e de acordo com o critério especificado pelo fabricante Oerlikon Metco, (porosidade média menor que 1,0%).

A Figura 6.6 mostra que a porosidade foi consideravelmente baixa para o revestimento elastômero PUR comercial. Isto pode ser explicado devido aos métodos de aplicação, cura e baixa umidade, conseguindo assim controlar a quantidade e o tamanho dos defeitos.

Segundo (HERNÁNDEZ et al.,) os pequenos poros esféricos observados neste tipo de revestimentos poliméricos podem ser devido à retenção de ar, pela fraca adesão do polímero aos possíveis reforços, remoção deles ou pigmentos.

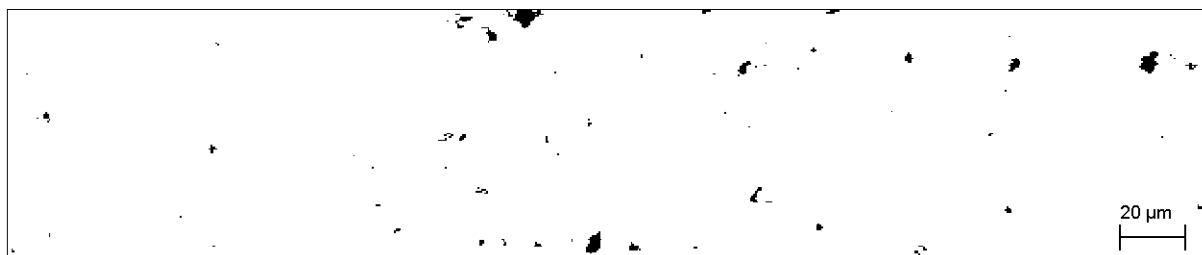


Figura 6.9 – Imagem por MEV do revestimento 86WC-10Co4Cr com tratamento de imagem para contrastar claros e escuros para realização da quantificação dos poros. Ampliação de 1000x.

6.1.0.6 Rugosidade Superficial

Tabela 9 – Resultado da medida da rugosidade média dos revestimentos 86WC-10Co4Cr, PUR e o Aço AISI 410 antes e após da erosão por lama nos ângulos avaliados.

Rugosidade Ra (μm)					
Material	Antes Erosão	Desvio Padrão	Ângulo (°)	Após Erosão	Desvio Padrão
86WC-10Co4Cr	0,08	0,02	30	1,60	0,11
			90	1,91	0,13
Aço AISI 410	0,07	0,03	30	2,97	0,47
			90	2,56	0,11
PUR	0,19	0,02	30	4,76	0,84
			90	2,70	0,22

6.1.0.7 Microdureza

A microdureza reflete a microestrutura e as propriedades físicas e mecânicas do substrato e do revestimento, que por sua vez são dependentes dos materiais e processos empregados na sua fabricação. A dureza é uma propriedade que varia no revestimento, devido ao fato de que no material pode se apresentar heterogeneidades, o que faz diminuir ou aumentar sua dureza em determinadas zonas. É por isso que na medição desta propriedade deve-se considerar o preparo da superfície, a seção analisada, bem como o número de indentações executadas.

O resultado da microdureza do revestimento aspergido e do Aço AISI 410 (substrato) está apresentado na Tabela 10. O valor da dureza do revestimento se apresenta compatível com a literatura consultada e de acordo com a especificação do fabricante Oerlikon Metco (750 a 1450 HV0,3).

Tabela 10 – Resultados das medidas de microdureza Vickers – seção transversal (HV0,3 – Carga 2,94N).

	86WC-10Co4Cr	Aço AISI 410
Média	1139	219,3
Desvio Padrão	170,70	31,07
Dispersão (%) (Desvio Padrão/Média)	14,98	14,16

De acordo com os valores de microdureza ao longo da seção transversal do revestimento aspergido, verificou-se que houve variações devido à não uniformidade das fases. Segundo (CASTRO et al.,) é possível observar que quando se trabalha com subcamadas (revestimentos aspergidos), ocorre a variação dos valores de microdureza, pois cada ponto da indentação pode estar localizado em microestruturas diferentes, nesse caso, carbonetos, óxidos, inclusões e a própria matriz. Como descreve (SOLUTION, 2011) materiais à base de WC apresentam-se como compósitos metais-cerâmicos, sendo que os valores de microdureza encontrados estão associados a cada microconstituente. A microestrutura depende da composição de cada fase, da morfologia do pó aspergido, da técnica de aspersão, da porosidade entre outros aspectos.

A Figura 6.10 mostra a indentação realizada para o revestimento 86WC-10Co4Cr. Observa-se na região da indentação a presença de pequenos grãos e o formato bem definido das quatro arestas da indentação. Esse ponto apresentou o maior valor de microdureza (1448 HV0,3) para esse revestimento e o valor mais perto da especificação do fabricante. Durante a pesquisa de (THAKUR et al., 2011) e (CASTRO et al.,) obtiveram resultados similares de 1297 ± 45 HV0,3 e 1256 HV respectivamente para revestimentos de WC-CoCr aspergidos por HVOF, da mesma maneira (BERGER et al., 2008) (KUMAR et al., 2016) (AHMED et al., 2015) e (MAITI; MUKHOPADHYAY; RAMAN, 2009) reportam valores de microdureza de 1031 ± 99 , 1180 ± 70 , 1118 ± 131 e 1106 HV0,3 para revestimentos similares e aspergidos pela mesma técnica.

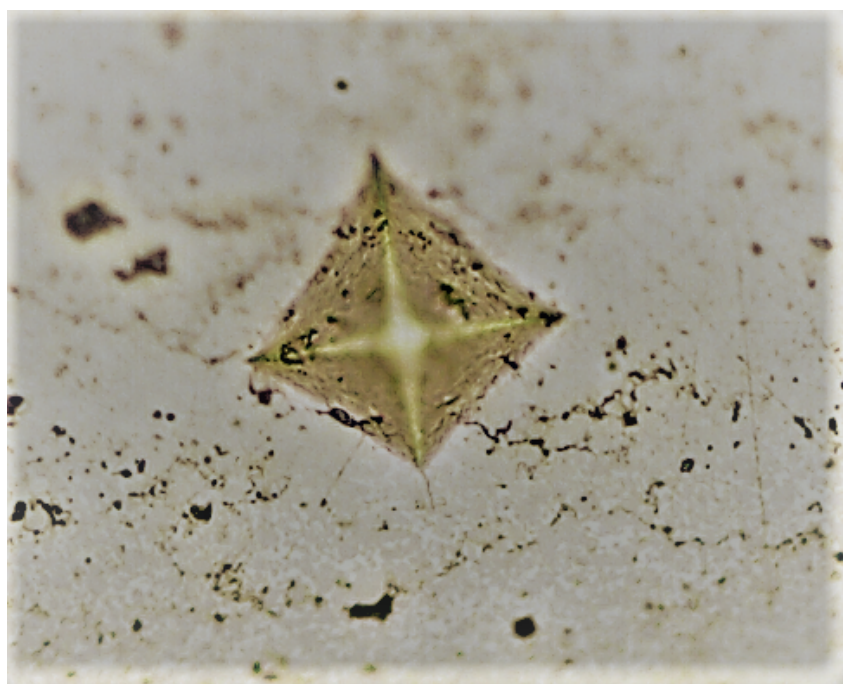


Figura 6.10 – Micrografia óptica (M.O) da indentação Vickers (1448 HV0,3) realizada para o revestimento 86WC-10Co4Cr. Ampliação de 50x.

A Figura 6.11 mostra a indentação realizada na região do substrato do revestimento, correspondente ao aço inoxidável martensítico AISI 410 tratado termicamente. O valor de microdureza medido foi de 219 HV_{0,3} muito similar ao reportado por (MAITI; MUKHOPADHYAY; RAMAN, 2009) de 199 HV_{0,3}.

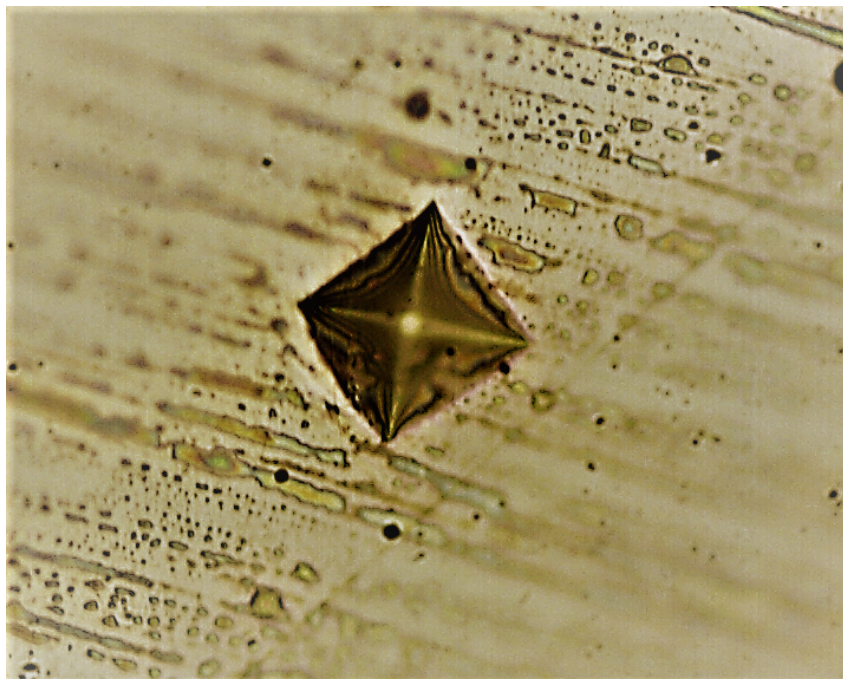


Figura 6.11 – Micrografia óptica (M.O) da indentação Vickers (219 HV_{0,3}) realizada para o aço inoxidável martensítico AISI 410 tratado termicamente. Ampliação de 50x.

6.2 DESGASTE EROSIVO POR LAMA

A Tabela 11 apresenta a taxa de erosão acumulada por massa de erodente impactada, em perda de volume das peças ensaiadas, em função do ângulo de ataque, em um tempo total de 4 minutos, para os materiais usados na pesquisa de aço Inox martensítico AISI 410, carbeto de Tungstênio (86WC-10Co4Cr) e o elastômero PUR comercial MetaLine 785.

Nos ensaios realizados com ângulo de ataque de 30° e 90°, o revestimento obtido previamente pela técnica de aspersão térmica HVOF de carbeto de Tungstênio 86WC-10Co4Cr teve o menor desgaste erosivo do que o aço Inox martensítico AISI 410 e o revestimento elastomérico PUR comercial MetaLine 785.

Para o ângulo de ataque de 30° o revestimento de carbeto de Tungstênio 86WC-10Co4Cr apresentou desempenho similar e taxa de erosão volumétrica acumulada, aproximadamente 50% menor do que o aço Inox martensítico AISI 410, como pode-se ver na Tabela 11 e Figura 6.12.

Tabela 11 – Taxa de erosão acumulada em perda de volume por massa de erodente impactada, em função do ângulo de ataque para um tempo total de ensaio de 4 minutos, para os materiais de aço Inox martensítico AISI 410, carbeto de Tungstênio (86WC-10Co4Cr) e o elastômero PUR comercial MetaLine 785.

Materiais	Ângulo de Ataque (°)	Taxa de Erosão Volumétrica ($cm^3_{alvo}/g_{erodente}$)* 10^{-5}	Desvio Padrão * 10^{-5}
Aço AISI 410	30	0,8449	0,0114
	90	0,7025	0,0495
86WC-10Co4Cr	30	0,4490	0,0023
	90	0,6778	0,0283
PUR	30	6,4837	0,0625
	90	3,0733	0,0054

Para o ângulo de ataque de 90°, o revestimento de carbeto de Tungstênio 86WC-10Co4Cr apresentou uma taxa de desgaste volumétrica acumulada ligeiramente inferior ao aço Inox martensítico AISI 410, além disso eles apresentaram uma taxa de erosão volumétrica acumulada aproximadamente 23% inferior do revestimento elastômero PUR comercial MetaLine 785, como pode-se ver na Figura 6.13.

As Figuras 6.12 e 6.13 mostram que o revestimento elastômero PUR comercial MetaLine 785 e o aço Inox martensítico AISI 410 apresentaram maior desgaste erosivo em ângulo de ataque de 30° do que em 90°, apresentando comportamento de material dúctil como o reportado pelos autores (ISLAM; FARHAT, 2014) e (OKONKWO et al., 2016).

Embora os mecanismos de remoção de material do revestimento elastômero PUR comercial MetaLine 785 no ângulo de 30° sejam supostamente diferentes: por corte (*cutting*), e por sulcamento (*ploughing*) para o aço Inox martensítico AISI 410, através sucessivas deformações plásticas até retirada de material. O anterior concorda com os resultados de diversos autores que confirmam que os revestimentos metálicos apresentam maior taxa de desgaste em ângulos inferiores (BAYER, 1994) (PAPINI; SPELT, 1998) (O'FLYNN et al., 2001) (BISWAS; SATAPATHY; PATNAIK, 2010).

Por outro lado, ao comparar as Figuras 6.12 e 6.13 pode-se ver que o revestimento de carbeto de Tungstênio (86WC-10Co4Cr) apresentou maior desgaste erosivo em ângulo de ataque de 90° do que em 30°, indicando um comportamento frágil desse revestimento. Isto se deve à ação repetida das partículas erosivas perpendicularmente à superfície, produzindo microfraturas que contribuem no desgaste do metal duro WC, resultando na sua eventual retirada, concordando com os resultados de (BARBER; MELLOR; WOOD, 2005).

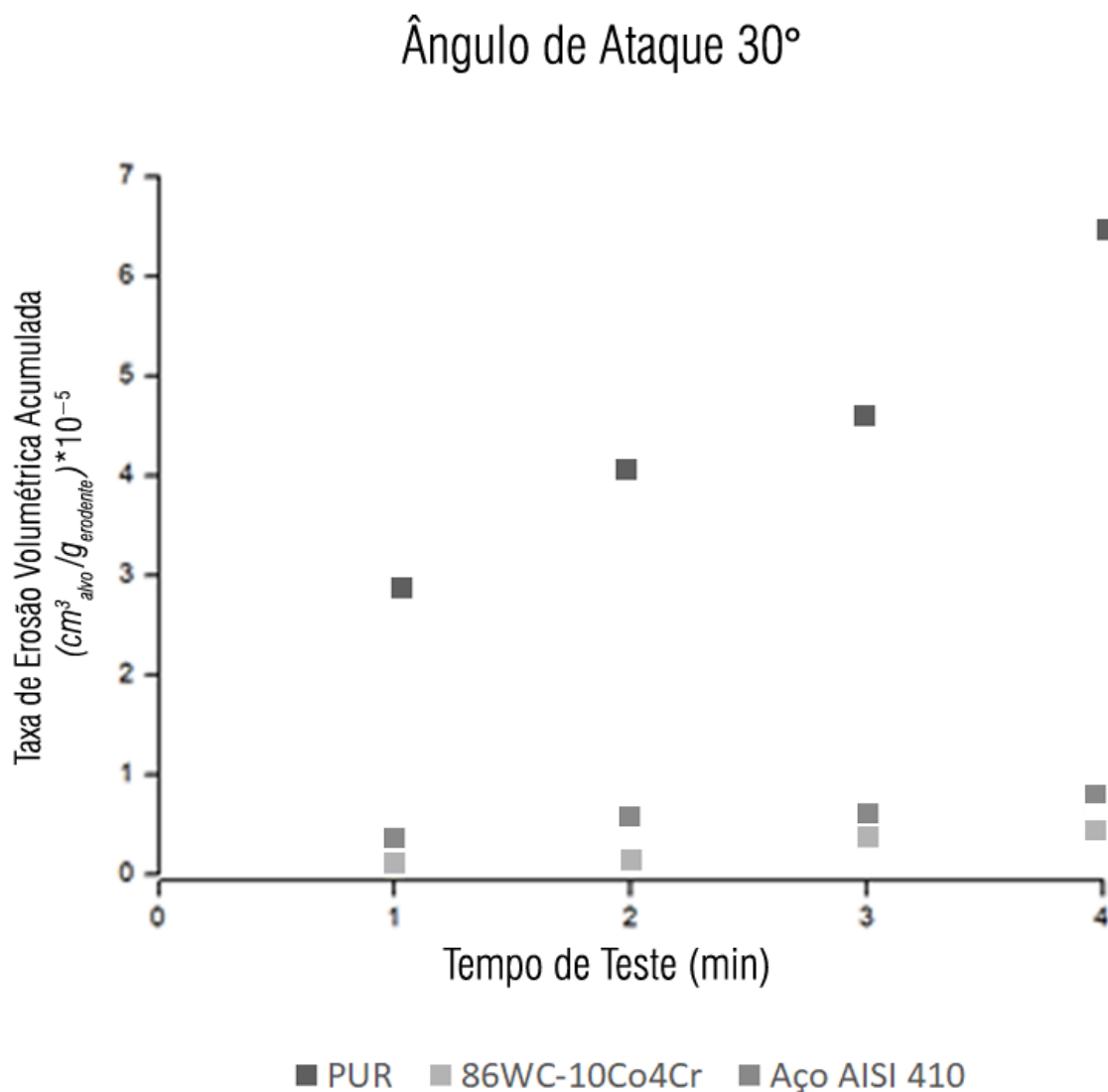


Figura 6.12 – Variação da taxa de erosão volumétrica acumulada, em função do ângulo de ataque de 30°, para os materiais, aço Inox martensítico AISI 410, carbeto de Tungstênio (86WC-10Co4Cr) e o elastômero PUR comercial MetaLine 785.

Como se mostra na Figura C.1 do Apêndice C, a taxa de erosão volumétrica aumentou com o acréscimo no tempo de teste a partir de 3 minutos, para o ângulo de ataque de 90° no revestimento elastomérico PUR comercial MetaLine 785, e a partir do tempo de 2 minutos no mesmo ângulo de ataque de 90°, para o revestimento de carbeto de Tungstênio (86WC-10Co4Cr) e o aço Inox martensítico AISI 410.

Para o caso do ângulo de ataque de 30° no revestimento elastomérico PUR comercial MetaLine 785, a taxa de erosão volumétrica aumentou com o acréscimo no tempo de teste a partir de 1 minuto, seguidamente a partir do tempo de 2 minutos no

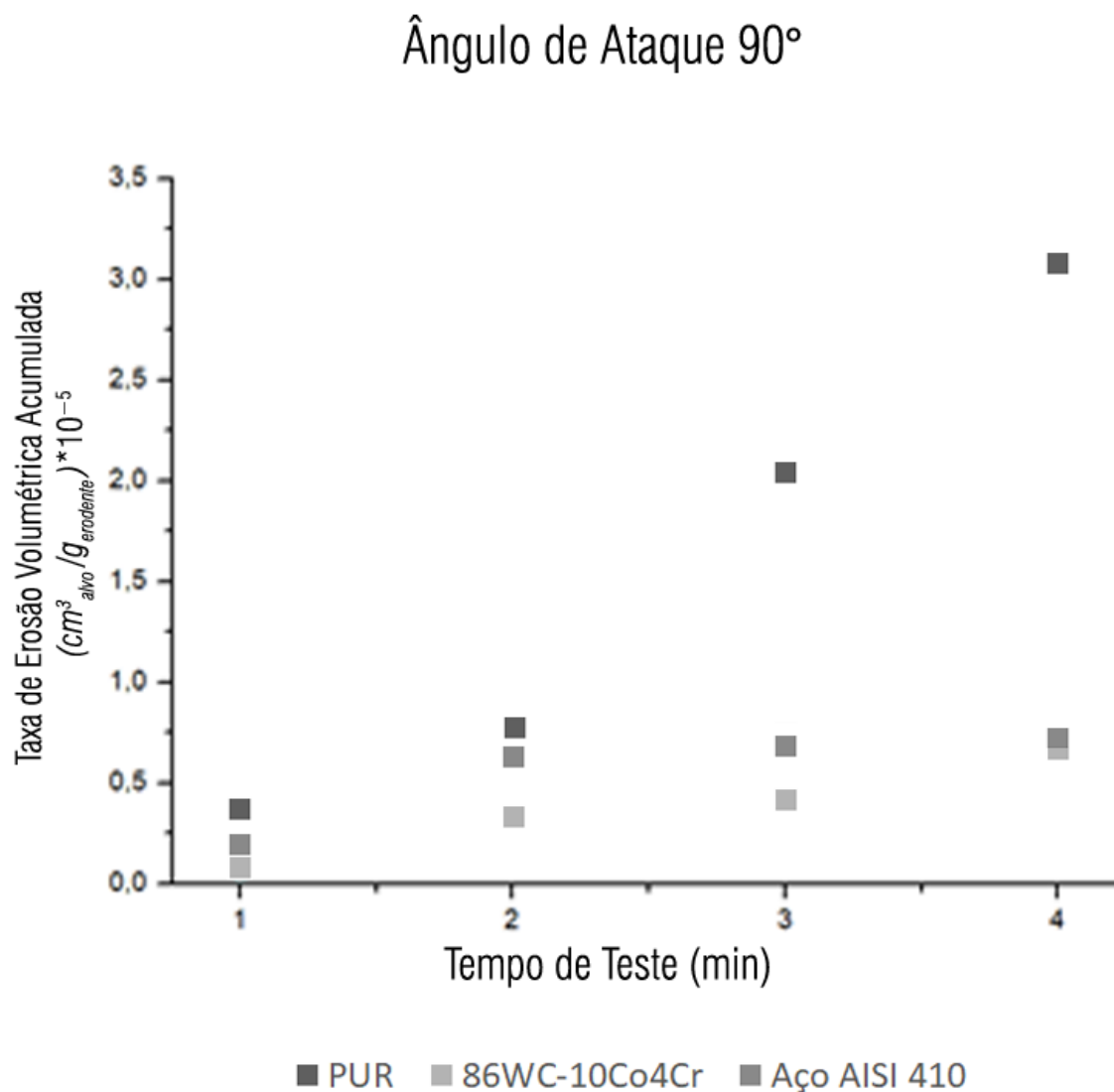


Figura 6.13 – Variação da taxa de erosão volumétrica acumulada, em função do ângulo de ataque de 90°, para os materiais, aço Inox martensítico AISI 410, carbeto de Tungstênio (86WC-10Co4Cr) e o elastômero PUR comercial MetaLine 785.

mesmo ângulo de ataque de 30°, para o aço Inox martensítico AISI 410, e finalmente para o revestimento de carbeto de Tungstênio (86WC-10Co4Cr) com tempo de teste a partir dos 3 minutos, como se amostra na Figura C.2 do Apêndice C.

A Figura 6.14 mostra as áreas das regiões desgastadas dos materiais submetidos ao ensaio de erosão por lama para os ângulos de ataque de 30° e de 90°. Observa-se que a região desgastada das peças (destacada em vermelho) ensaiadas com ângulo de 30° apresentam um formato alongado e maior área de desgaste. O desgaste das peças ensaiadas com ângulo de 90° é mais localizado, possui uma área

menor e maior profundidade. No caso dos materiais metálicos se consegue apreciar a pequena formação do anel concêntrico, descrito como a erosão "halo" na literatura, que é uma característica mecânica do dano devido ao desenvolvimento de crateras que aparecem como macro pits na superfície para este ângulo (WOOD, 1986) (SOUZA; NEVILLE, 2003) (VITE-TORRES et al., 2013). A região desgastada apresenta maior rugosidade nos corpos de prova, para os dois ângulos de ataque como se mostra na Tabela 9.

A Tabela 12 apresenta as áreas das regiões desgastadas de acordo com o ângulo de ataque. Nota-se que a área desgastada é maior para o ângulo de ataque de 30°. O revestimento obtido previamente pela técnica de aspersão térmica HVOF de carbetto de Tungstênio 86WC-10Co4Cr apresentou menor área desgastada para os dois ângulos de ataque estudados.

Tabela 12 – Área desgastada em função do ângulo de ataque para os materiais aço Inox martensítico AISI 410, carbetto de Tungstênio (86WC-10Co4Cr) e o elastômero PUR comercial MetaLine 785.

Materiais	Ângulo de Ataque (°)	Área desgastada (mm ²)
Aço AISI 410	30	277,7
	90	147,1
86WC-10Co4Cr	30	201,2
	90	94,9
PUR	30	216,3
	90	186,1

A Figura 6.15 mostra a digitalização tridimensional dos materiais submetidos ao ensaio de erosão por lama obtidos através do programa Geomagic Studio, para os ângulos de ataque de 30° e de 90°, com o qual foi possível ter estimada a média da profundidade desgastada pelo erodente, apresentando como resultado que a profundidade média das peças ensaiadas com ângulo de 90° possuem uma maior profundidade e uma erosão mais localizada em relação às peças ensaiadas a 30°.

O estudo de erosão dos pesquisadores (ISLAM; FARHAT, 2014) realizado em tubos de aço, variando ângulo de impacto e velocidade, obteve uma profundidade de $96 \pm 2 \mu m$ e $70 \pm 2 \mu m$ respectivamente. Sendo assim, para ângulos de 90° ocorre um desgaste mais profundo em relação às peças ensaiadas a 30°, resultados semelhantes aos nossos, como se mostra na Tabela 13.

Igualmente os pesquisadores (VITE-TORRES et al., 2013) investigaram o desempenho do aço inoxidável AISI 420 submetido a ensaios de erosão por partículas sólidas, utilizando dois abrasivos diferentes nos ângulos de incidência de 30°, 45°, 60° e 90°.

Os resultados também mostraram que as amostras avaliadas em 90° apresentaram maior perfil de profundidade do que as de 30° sob dois abrasivos diferentes, obtendo assim, 450 e 929 *nm* para o ângulo de 90°, e para o ângulo de 30° uma profundidade de 180 e 400 *nm* respectivamente.

No entanto, os pesquisadores (PAPINI; SPELT, 1998) investigaram o mecanismo de erosão, para um revestimento orgânico fino de PUR, submetido ao impacto de esferas de aço como erosivo, com o objetivo de conhecer o tamanho da cratera, profundidade e sua forma, em função da velocidade e dos ângulo incidentes, obtendo assim igualmente, que para o ângulo de 90° os revestimentos apresentaram maior perfil de profundidade, do que para os ângulos menores de 30° e 20°, com perfil de profundidade de 430, 360 e 320 μm respectivamente.

A Tabela 13 apresenta as profundidades das regiões desgastadas de acordo com o ângulo de ataque, obtidas da digitalização tridimensional dos materiais através do programa Geomagic Studio. Nota-se que a profundidade média é maior para o ângulo de ataque de 90°. O revestimento obtido previamente pela técnica de aspersão térmica HVOF de carbeto de Tungstênio 86WC-10Co4Cr, apresentou menor perfil de profundidade para os dois ângulos de ataque estudados.

Tabela 13 – Profundidade média das regiões desgastadas, obtidas da digitalização tridimensional das peças ensaiadas através do programa Geomagic Studio, em função do ângulo de ataque, para os materiais aço Inox martensítico AISI 410, carbeto de Tungstênio (86WC-10Co4Cr) e o elastômero PUR comercial MetaLine 785.

Materiais	Ângulo de Ataque (°)	Profundidade Média μm	Desvio Padrão
Aço AISI 410	30	93	$\pm 2,88$
	90	102	$\pm 15,87$
86WC-10Co4Cr	30	33	$\pm 5,77$
	90	62	$\pm 3,21$
PUR	30	373	$\pm 15,27$
	90	387	$\pm 5,77$

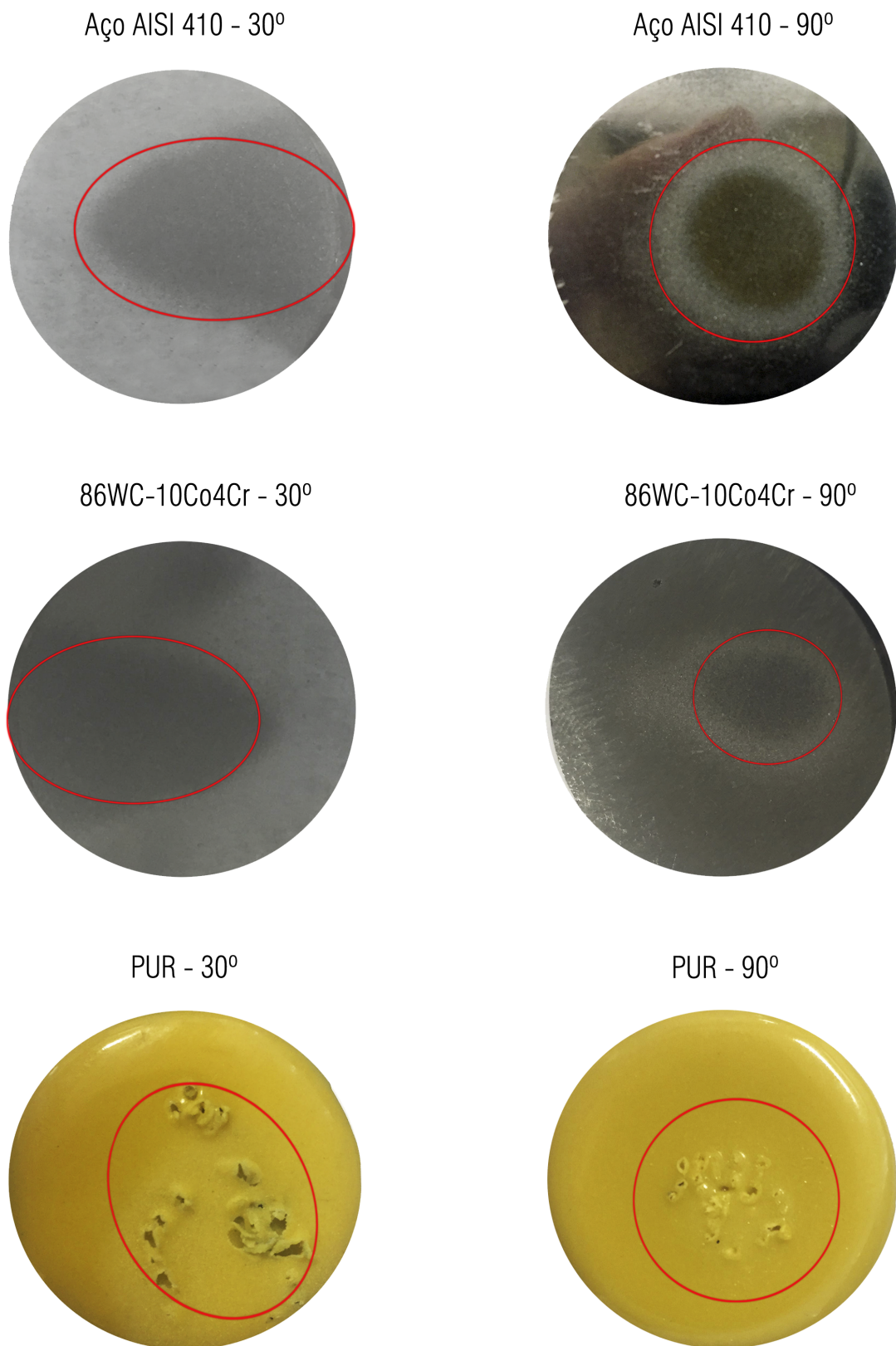


Figura 6.14 – Áreas das regiões desgastadas dos materiais submetidos ao ensaio de erosão por lama. Coluna da esquerda: ângulo de ataque de 30°. Coluna da direita: ângulo de ataque 90°.

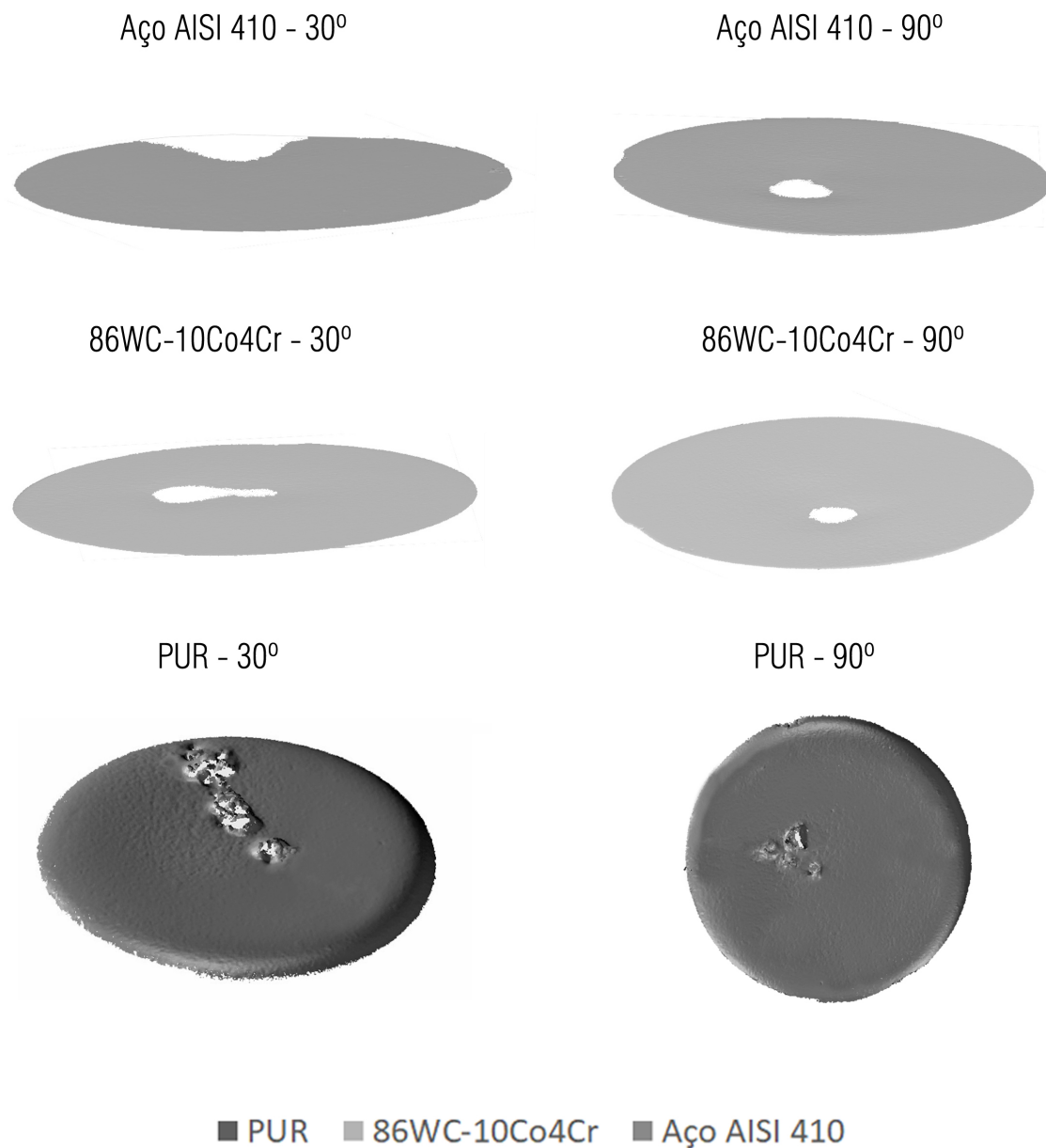


Figura 6.15 – Digitalização tridimensional dos materiais submetidos ao ensaio de erosão por lama, para a obtenção da profundidade desgastada pelo erodente com o programa Geomagic Studio. Coluna da esquerda: ângulo de ataque de 30°. Coluna da direita: ângulo de ataque 90°.

7 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos na realização do trabalho experimental, é possível inferir as seguintes conclusões:

- Desenvolveu-se o equipamento experimental de simulação de desgaste erosivo do tipo lama, com as condições que permitiram o controle dos parâmetros de teste como o ângulo de impacto, a velocidade do impacto, concentração de partículas erosivas na suspensão e temperatura de ensaio, variáveis significativas na determinação do comportamento dos materiais e suas propriedades mecânicas submetidos nas condições propostas pelo trabalho.
- O revestimento de 86WC-10Co4Cr carbeto de Tungstênio apresentou uma melhor resistência ao desgaste erosivo tipo lama em comparação com os outros materiais, possivelmente devido à baixa porosidade, à dureza das partículas de WC e às melhores propriedades da matriz do material aglutinante de CoCr.
- O alto conteúdo da mistura usada de WC-Co no revestimento promove uma maior conectividade da fase dura, o que leva a uma maior resistência mecânica e ao desgaste erosivo de tipo lama no material.
- Os materiais de aço Inox martensítico AISI 410 e o revestimento elastômero PUR comercial MetaLine 785 apresentaram maior taxa de erosão volumétrica acumulada no ângulo de ataque de 30°, apresentando um comportamento de material dúctil. Por outro lado, a taxa de erosão volumétrica acumulada para o revestimento de 86WC-10Co4Cr foi maior no ângulo de ataque de 90°.
- Para o ângulo de ataque de 30° o revestimento de carbeto de Tungstênio 86WC-10Co4Cr apresentou uma taxa de erosão volumétrica acumulada aproximadamente 50% menor do que o aço Inox martensítico AISI 410.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Após a realização desse trabalho, é possível fazer as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Avaliar o desgaste corrosivo dos revestimentos;
- Avaliar a influência do desgaste erosivo por lama dos revestimentos com diferentes tipos de partículas erodentes, bem como seus tamanhos;
- Realizar ensaios de tribologia nos revestimentos;
- Avaliar a erosão dos revestimentos para diferentes temperaturas e para outros ângulos de desgaste.
- Avaliar a influência da velocidade de impacto das partículas no desgaste erosivo por lama destes revestimentos.
- Avaliar a influência da incrustação das partículas de alumina no desgaste erosivo por lama, especialmente nos revestimentos poliméricos.

REFERÊNCIAS

AHMED, R. et al. Sliding wear investigation of suspension sprayed wc-co nanocomposite coatings. *Wear*, Elsevier, v. 322, p. 133–150, 2015. Citado na página [50](#).

ANNA, L. B. S. Estudo da erosão-corrosão nos aços abnt 8550 e inoxidável 301. Universidade Federal do Espírito Santo, 2008. Citado na página [23](#).

ARÉVALO, J. L. M. La tecnología de recuperación y protección contra el desgaste está en el rociado térmico. *Prospectiva*, v. 12, n. 1, p. 70–78, 2014. Citado na página [15](#).

ARORA, M.; OHL, C.-D.; MØRCH, K. A. Cavitation inception on microparticles: A self-propelled particle accelerator. *Physical review letters*, APS, v. 92, n. 17, p. 174501, 2004. Citado na página [26](#).

BAGHERI, R.; MAROUF, B.; PEARSON, R. Rubber-toughened epoxies: a critical review. *Journal of Macromolecular Science®*, Part C: Polymer Reviews, Taylor & Francis, v. 49, n. 3, p. 201–225, 2009. Citado 3 vezes nas páginas [10](#), [43](#) e [46](#).

BAGHERI, R.; PEARSON, R. A. Role of particle cavitation in rubber-toughened epoxies: 1. microvoid toughening. *Polymer*, Elsevier, v. 37, n. 20, p. 4529–4538, 1996. Citado 2 vezes nas páginas [10](#) e [43](#).

BALL, A. The mechanisms of wear, and the performance of engineering materials. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, Southern African Institute of Mining and Metallurgy, v. 86, n. 1, p. 1–13, 1986. Citado na página [27](#).

BARBER, J.; MELLOR, B.; WOOD, R. The development of sub-surface damage during high energy solid particle erosion of a thermally sprayed wc-co-cr coating. *Wear*, Elsevier, v. 259, n. 1-6, p. 125–134, 2005. Citado na página [52](#).

BARKOULA, N.-M.; KARGER-KOCSIS, J. Review processes and influencing parameters of the solid particle erosion of polymers and their composites. *Journal of materials science*, Springer, v. 37, n. 18, p. 3807–3820, 2002. Citado 3 vezes nas páginas [2](#), [13](#) e [38](#).

BAYER, R. G. Mechanical wear prediction and prevention. *Marcel! Dekker, Inc, P. O. Box 5005, Monticello, NY 12701-5185, USA*, 1994. 657, 1994. Citado 2 vezes nas páginas [21](#) e [52](#).

BERGER, L.-M. et al. Microstructure and properties of hvof-sprayed chromium alloyed wc-co and wc-ni coatings. *Surface and Coatings Technology*, Elsevier, v. 202, n. 18, p. 4417–4421, 2008. Citado na página [50](#).

BERGMANN, C. P.; VICENZI, J. Protection against erosive wear using thermal sprayed cermet: a review. In: *Protection against Erosive Wear Using Thermal Sprayed Cermet*. [S.l.]: Springer, 2011. p. 1–77. Citado na página [19](#).

BERTHIER, Y. Experimental evidence for friction and wear modelling. *Wear*, Elsevier, v. 139, n. 1, p. 77–92, 1990. Citado na página [23](#).

- BESTER, J. A. *The slurry erosive-corrosive wear of a selection of aluminium alloys, particulate reinforced aluminium metal matrix composites and a selection of steels*. Tese (Doutorado) — University of Cape Town, 1993. Citado 2 vezes nas páginas [XI](#) e [27](#).
- BHUSHAN, B. *Handbook of micro/nano tribology*. [S.l.]: CRC press, 1998. Citado na página [8](#).
- BHUSHAN, B. *Principles and applications of tribology*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2013. Citado na página [23](#).
- BILLMEYER, F. W. *Ciencia de los polímeros*. [S.l.]: Reverté, 1975. Citado na página [9](#).
- BISWAS, S.; SATAPATHY, A.; PATNAIK, A. Erosion wear behavior of polymer composites: a review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 29, n. 19, p. 2898–2924, 2010. Citado na página [52](#).
- BÖHM, H.; BETZ, S.; BALL, A. The wear resistance of polymers. *Tribology International*, Elsevier, v. 23, n. 6, p. 399–406, 1990. Citado na página [2](#).
- BUDINSKI, K. G.; BUDINSKI, M. K. Engineering materials. *Nature*, v. 25, p. 28, 2009. Citado na página [11](#).
- BUSZKO, M.; KRELLA, A. Slurry erosion—design of test devices. *Advances in Materials Science*, De Gruyter Open, v. 17, n. 2, p. 5–17, 2017. Citado 3 vezes nas páginas [XI](#), [25](#) e [26](#).
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. *Materials science and engineering*. [S.l.]: John Wiley & Sons NY, 2011. v. 5. Citado na página [10](#).
- CARROUGE, D.; BHADESHIA, H.; WOOLLIN, P. Microstructural change in high temperature heat-affected zone of low carbon weldable '13% cr' martensitic stainless steels. *Stainless Steel World(The Netherlands)*, v. 14, p. 16–17, 2002. Citado na página [9](#).
- CASTRO, G. et al. Microestrutura de materiais compuestos wc-co/ni-w-cr recubiertos por hvof. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, v. 21, n. 1, 2001. Citado na página [43](#).
- CASTRO, R. et al. Avaliação das características de superfície e do desgaste abrasivo de revestimentos aplicados em hastes de cilindros hidráulicos pelas técnicas de aspersão (hvof) e eletrodeposição. Citado na página [50](#).
- CHAWLA, K. K.; MEYERS, M. *Mechanical behavior of materials*. [S.l.]: Prentice Hall, 1999. Citado na página [11](#).
- CHEN, C. et al. Highly dispersed nanosilica–epoxy resins with enhanced mechanical properties. *Polymer*, Elsevier, v. 49, n. 17, p. 3805–3815, 2008. Citado na página [10](#).
- CHIVAVIBUL, P. et al. Effects of particle strength of feedstock powders on properties of warm-sprayed wc-co coatings. *Journal of thermal spray technology*, Springer, v. 20, n. 5, p. 1098–1109, 2011. Citado na página [42](#).

- CINCA, N.; LIMA, C. R. C.; GUILMANY, J. M. An overview of intermetallics research and application: Status of thermal spray coatings. *Journal of Materials Research and Technology*, Elsevier, v. 2, n. 1, p. 75–86, 2013. Citado na página 15.
- CLARK, H. M.; HAWTHORNE, H.; XIE, Y. Wear rates and specific energies of some ceramic, cermet and metallic coatings determined in the coriolis erosion tester. *Wear*, Elsevier, v. 233, p. 319–327, 1999. Citado na página 18.
- DAVIS, J. R. *Alloy digest sourcebook: stainless steels*. [S.l.]: ASM international, 2000. Citado na página 8.
- DAVIS, J. R. et al. *Handbook of thermal spray technology*. [S.l.]: ASM international, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 21.
- DESHPANDE, S. et al. Application of image analysis for characterization of porosity in thermal spray coatings and correlation with small angle neutron scattering. *Surface and coatings technology*, Elsevier, v. 187, n. 1, p. 6–16, 2004. Citado na página 36.
- DONG, X.; JAHANMIR, S.; HSU, S. M. Tribological characteristics of α -alumina at elevated temperatures. *Journal of the American Ceramic Society*, Wiley Online Library, v. 74, n. 5, p. 1036–1044, 1991. Citado na página 22.
- EBEWELE, R. O. *Polymer science and technology*. [S.l.]: CRC press, 2000. Citado na página 9.
- ENGQVIST, H.; AXEN, N.; HOGMARK, S. Tribological properties of a binderless carbide. *Wear*, Elsevier, v. 232, n. 2, p. 157–162, 1999. Citado na página 20.
- FINCKE, J. R. et al. Diagnostics and control in the thermal spray process. *Surface and Coatings Technology*, Elsevier, v. 146, p. 537–543, 2001. Citado na página 15.
- FINNIE, I. Erosion of surfaces by solid particles. *wear*, Elsevier, v. 3, n. 2, p. 87–103, 1960. Citado na página 25.
- FINNIE, I. Some reflections on the past and future of erosion. *Wear*, Elsevier, v. 186, p. 1–10, 1995. Citado 5 vezes nas páginas 19, 22, 25, 27 e 38.
- GAHR, K. Z. Microstructure and wear of materials, 1987. 1987. Citado na página 23.
- GOLDBERG, D.; LAUMAN, G. F. *Cavitation-resistant polymer and coating*. [S.l.]: Google Patents, 1989. US Patent 4,847,122. Citado na página 43.
- GOMES, U. U. *Tecnologia dos pós: fundamentos e aplicações*. [S.l.]: UFRN Editora Universitária, 1995. Citado na página 14.
- GOYAL, D. K. et al. Slurry erosion behaviour of hvof sprayed wc–10co–4cr and al 2 o 3+ 13tio 2 coatings on a turbine steel. *Wear*, Elsevier, v. 289, p. 46–57, 2012. Citado na página 43.
- GREWAL, H.; AGRAWAL, A.; SINGH, H. Design and development of high-velocity slurry erosion test rig using cfd. *Journal of materials engineering and performance*, Springer, v. 22, n. 1, p. 152–161, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.
- GREWAL, H.; AGRAWAL, A.; SINGH, H. Identifying erosion mechanism: A novel approach. *Tribology Letters*, Springer, v. 51, n. 1, p. 1–7, 2013. Citado na página 24.

GREWAL, H. et al. Slurry erosion performance of ni-al₂o₃ based thermal-sprayed coatings: effect of angle of impingement. *Journal of thermal spray technology*, Springer, v. 23, n. 3, p. 389–401, 2014. Citado na página 24.

GROOVER, M. P. *Fundamentos de manufatura moderna: materiais, procesos y sistemas*. [S.l.]: Pearson Educación, 1997. Citado na página 13.

GUAGLIANONI, W. C. Síntese, caracterização e aplicação por hvof de um nanocompósito de wccocr/nicr para uso como revestimento protetor contra o desgaste erosivo em equipamentos da indústria do petróleo. 2015. Citado na página 48.

GUILEMANY, J. et al. Characterization of the w 2 c phase formed during the high velocity oxygen fuel spraying of a wc+ 12 pct co powder. *Metallurgical and Materials Transactions A*, Springer, v. 30, n. 8, p. 1913–1921, 1999. Citado na página 42.

GUO, D.; WANG, L.; LI, J. Erosive wear of low chromium white cast iron. *Wear*, Elsevier, v. 161, n. 1-2, p. 173–178, 1993. Nenhuma citação no texto.

HANDBOOK, A. Friction, lubrication and wear technology. *ASM International*, v. 18, p. 362–369, 1992. Citado na página 21.

HARVEY, E. N.; MCELROY, W. D.; WHITELEY, A. On cavity formation in water. *Journal of Applied Physics*, AIP, v. 18, n. 2, p. 162–172, 1947. Citado na página 22.

HERNÁNDEZ, C. E. C. et al. *Relación entre resistencia a cavitación y propiedades físico-químicas y mecánicas de recubrimientos poliméricos para aplicaciones en turbinas hidráulicas*. Tese (Doutorado) — Universidad Nacional de Colombia. Citado na página 48.

HOPPERT, H. Alumina ceramics—superior materials for protection against wear and corrosion. *Aufbereit.-Tech.*, v. 30, n. 10, p. 625–634, 1989. Citado na página 23.

HUSSAINOVA, I.; KUBARSEPP, J.; PIRSO, J. Mechanical properties and features of erosion of cermets. *Wear*, Elsevier, v. 250, n. 1-12, p. 818–825, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.

HUTCHINGS, I. A model for the erosion of metals by spherical particles at normal incidence. *Wear*, Elsevier, v. 70, n. 3, p. 269–281, 1981. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 38.

INGOLE, S. P. et al. *Tribology for Scientists and Engineers: From Basics to Advanced Concepts*. [S.l.]: Springer, 2013. Citado 3 vezes nas páginas XI, 23 e 24.

ISLAM, M. A.; FARHAT, Z. N. Effect of impact angle and velocity on erosion of api x42 pipeline steel under high abrasive feed rate. *Wear*, Elsevier, v. 311, n. 1-2, p. 180–190, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 52 e 55.

JR, G. F. S. *Materials parameters that govern the rain erosion behavior of polymeric coatings and composites at subsonic velocities*. [S.l.], 1971. Citado na página 13.

KRAUSS, G. *Steels: processing, structure, and performance*. [S.l.]: Asm International, 2015. Citado na página 9.

- KULU, P.; HUSSAINOVA, I.; VEINTHAL, R. Solid particle erosion of thermal sprayed coatings. *Wear*, Elsevier, v. 258, n. 1-4, p. 488–496, 2005. Citado 2 vezes nas páginas [XI](#) e [20](#).
- KULU, P.; PIHL, T. Selection criteria for wear resistant powder coatings under extreme erosive wear conditions. *Journal of thermal spray technology*, Springer, v. 11, n. 4, p. 517–522, 2002. Citado na página [19](#).
- KUMAR, R. et al. Effect of spray particle velocity on cavitation erosion resistance characteristics of hvof and hvaf processed 86wc-10co4cr hydro turbine coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, Springer, v. 25, n. 6, p. 1217–1230, 2016. Citado 3 vezes nas páginas [1](#), [48](#) e [50](#).
- LATHABAI, S.; PENDER, D. Microstructural influence in slurry erosion of ceramics. *Wear*, Elsevier, v. 189, n. 1-2, p. 122–135, 1995. Citado na página [25](#).
- LEVY, A. V.; YAU, P. Erosion of steels in liquid slurries. *Wear*, Elsevier, v. 98, p. 163–182, 1984. Citado 3 vezes nas páginas [1](#), [27](#) e [37](#).
- LOCATELLI, A. Determinação do comportamento ao desgaste erosivo a diferentes temperaturas de um revestimento a base de fenbcrw aplicado pela técnica de arco elétrico. 2009. Citado na página [14](#).
- LÓPEZ, D.; TSCHIPTSCHIN, A. P.; FALLEIROS, N. A. Sinergismo erosión-corrosión en un acero inoxidable martensítico aisi 410: Erosion-corrosion synergism of an aisi 410 martensitic stainless steel. *Dyna*, 2006, Revista DYNA, v. 76, n. 159, p. 53–60, 2009. Citado na página [43](#).
- LUDEMA, K. C. *Friction, wear, lubrication: a textbook in tribology*. [S.l.]: CRC press, 1996. Citado na página [22](#).
- MADSEN, B. W. Measurement of erosion-corrosion synergism with a slurry wear test apparatus. *Wear*, Elsevier, v. 123, n. 2, p. 127–142, 1988. Citado na página [41](#).
- MAITI, A.; MUKHOPADHYAY, N.; RAMAN, R. Improving the wear behavior of wc-cocr-based hvof coating by surface grinding. *Journal of materials engineering and performance*, Springer, v. 18, n. 8, p. 1060, 2009. Citado 2 vezes nas páginas [50](#) e [51](#).
- MARDEL, J.; CHYNOWETH, K.; HILL, A. The wear of polyurethane elastomers. In: *Mater. Forum(Australia)*. [S.l.: s.n.], 1995. v. 19, p. 117–128. Citado na página [13](#).
- MCCOLM, I. J. Ceramic science for materials technologists. 1983. Citado na página [14](#).
- MONIZ, B. *Metallurgy*. [S.l.]: American Technical Publishers, 1994. Citado na página [8](#).
- NEMETH, B. J.; GRAB, G. P. *Preferentially binder enriched cemented carbide bodies and method of manufacture*. [S.l.]: Google Patents, 1986. US Patent 4,610,931. Citado na página [14](#).
- NORMA, D. 50320: análise sistemática dos processos de desgaste. *Classificação dos fenômenos de desgaste. Metalurgia e Materiais*, v. 53, p. 619–622, 1997. Citado na página [21](#).

O'FLYNN, D. et al. A model to predict the solid particle erosion rate of metals and its assessment using heat-treated steels. *Wear*, Elsevier, v. 248, n. 1-2, p. 162–177, 2001. Citado na página 52.

OKA, Y. I.; OKAMURA, K.; YOSHIDA, T. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: Part 1: Effects of impact parameters on a predictive equation. *Wear*, Elsevier, v. 259, n. 1, p. 95–101, 2005. Citado na página 26.

OKONKWO, P. C. et al. Erosion behaviour of api x100 pipeline steel at various impact angles and particle speeds. *Metals*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 6, n. 10, p. 232, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 52.

OYAMA, S. T. Introduction to the chemistry of transition metal carbides and nitrides. In: *The chemistry of transition metal carbides and nitrides*. [S.l.]: Springer, 1996. p. 1–27. Citado na página 14.

PAPINI, M.; SPELT, J. The plowing erosion of organic coatings by spherical particles. *Wear*, Elsevier, v. 222, n. 1, p. 38–48, 1998. Citado 2 vezes nas páginas 52 e 56.

PECKNER, D.; BERNSTEIN, I. M. Handbook of stainless steels. *McGraw-Hill Book Co., New York*. 1977, (Chapters paged separately), 1977. Citado na página 7.

RAO, P. V.; BUCKLEY, D. H. Angular particle impingement studies of thermoplastic materials at normal incidence. *ASLE transactions*, Taylor & Francis, v. 29, n. 3, p. 283–298, 1986. Citado na página 2.

RAYES, M. M. E.; ABDO, H. S.; KHALIL, K. A. Erosion-corrosion of cermet coating. *International Journal of Electrochemical Science*, v. 8, n. 1, p. 1117–1137, 2013. Citado na página 19.

ROMAN, J.; BIENVENU, G.; GAUGER, J. *Composite materials resistant to wear and a process for their manufacture*. Google Patents, 1997. US Patent 5,665,807. Disponível em: <<http://www.google.com.af/patents/US5665807>>. Citado na página 10.

SANTA, J.; BAENA, J.; TORO, A. Slurry erosion of thermal spray coatings and stainless steels for hydraulic machinery. *Wear*, Elsevier, v. 263, n. 1, p. 258–264, 2007. Citado na página 37.

SANTA, J. et al. Slurry and cavitation erosion resistance of thermal spray coatings. *Wear*, Elsevier, v. 267, n. 1, p. 160–167, 2009. Citado na página 37.

SEYMOUR, R. B.; CARRAHER, C. E. *Polymer chemistry*. [S.l.]: Marcel Dekker New York, 2000. v. 181. Citado na página 9.

SHEWMON, P.; SUNDARARAJAN, G. The erosion of metals. *Annual Review of Materials Science*, Annual Reviews 4139 El Camino Way, PO Box 10139, Palo Alto, CA 94303-0139, USA, v. 13, n. 1, p. 301–318, 1983. Citado na página 22.

SHITOLE, P. P. et al. Effect of impacting particle kinetic energy on slurry erosion wear. *Journal of Bio-and Tribo-Corrosion*, Springer, v. 1, n. 4, p. 29, 2015. Citado na página 26.

SMITH, W. F. H. et al. *Ciencia e ingeniería de materiales*. [S.l.]: McGraw-Hill, 2004. Citado na página 7.

SOLUTION, T. S. Hydraulic seals/rod seals. *Catálogo de Produtos, Suécia*, 2011. Citado na página 50.

SOUZA, V. D.; NEVILLE, A. Corrosion and erosion damage mechanisms during erosion–corrosion of wc–co–cr cermet coatings. *Wear*, Elsevier, v. 255, n. 1-6, p. 146–156, 2003. Citado na página 55.

STANDARD, A. Astm g40-17 (2017) standard terminology relating to wear and erosion. *ASTM International, Pennsylvania*. Citado na página 21.

STANDARD, A. Astm g76-13 (2013) standard test method for conducting erosion tests by solid particle impingement using gas jets. *ASTM International, Pennsylvania*. Citado na página 22.

STANDARD, A. D7348–13 (2013) standard test methods for loss on ignition (loi) of solid combustion residues. *ASTM International, Pennsylvania*. Citado na página 35.

STANDARD, A. E2109 01 (2014) standard test methods for determining area percentage porosity in thermal sprayed coatings. *ASTM International, Pennsylvania*. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 48.

SZERI, A. Z. *Tribology: friction, lubrication, and wear*. [S.l.]: McGraw Hill, 1980. Citado na página 22.

THAKUR, L. et al. An investigation on erosion behavior of hvof sprayed wc–cocr coatings. *Applied Surface Science*, Elsevier, v. 258, n. 3, p. 1225–1234, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 44, 48 e 50.

TIPTON, A. The effect of hvof thermal spray on the elevated temperature high cycle fatigue behavior of a martensitic stainless steel. *Dresser-Rand, New York, NY*, 2002. Citado na página 15.

TORO, A. et al. Corrosion–erosion of nitrogen bearing martensitic stainless steels in seawater–quartz slurry. *Wear*, Elsevier, v. 251, n. 1, p. 1257–1264, 2001. Citado na página 1.

TRELOAR, L. R. G. *The physics of rubber elasticity*. [S.l.]: Oxford University Press, USA, 1975. Citado na página 12.

TREVISAN, R.; LIMA, C. *Aspersao termica fundamentos e aplicacoes*. *Sao Paulo, Brasil: Editorial Artliber*, 2002. Citado na página 16.

TSIANG, T.-H. Survey of sand and rain erosion of composite materials. *Journal of Composites, Technology and Research*, ASTM International, v. 8, n. 4, p. 154–158, 1986. Citado na página 13.

UPADHYAYA, G. S. Materials science of cemented carbides—an overview. *Materials & Design*, Elsevier, v. 22, n. 6, p. 483–489, 2001. Citado na página 20.

VITE-TORRES, M. et al. Study of solid particle erosion on aisi 420 stainless steel using angular silicon carbide and steel round grit particles. *Wear*, Elsevier, v. 301, n. 1-2, p. 383–389, 2013. Citado na página 55.

- WALLEY, S.; FIELD, J. E. The erosion and deformation of polyethylene by solid-particle impact. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, The Royal Society, v. 321, n. 1558, p. 277–303, 1987. Citado na página [2](#).
- WANG, B.-Q.; VERSTAK, A. Elevated temperature erosion of hvof cr₃c₂/tic–nicrmo cermet coating. *Wear*, Elsevier, v. 233, p. 342–351, 1999. Citado na página [20](#).
- WENTZEL, E.; ALLEN, C. The erosion-corrosion resistance of tungsten-carbide hard metals. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Elsevier, v. 15, n. 1-3, p. 81–87, 1997. Citado na página [37](#).
- WOOD, F. W. Erosion by solid-particle impacts: a testing update. *Journal of testing and evaluation*, ASTM International, v. 14, n. 1, p. 23–27, 1986. Citado na página [55](#).
- YILDIZLI, K.; KARAMIŞ, M.; NAIR, F. Erosion mechanisms of nodular and gray cast irons at different impact angles. *Wear*, Elsevier, v. 261, n. 5-6, p. 622–633, 2006. Citado na página [41](#).
- ZAHAVI, J.; JR, G. F. S. Solid particle erosion of polymeric coatings. *Wear*, Elsevier, v. 71, n. 2, p. 191–210, 1981. Citado na página [2](#).
- ZHANG, H. et al. Studies of splat morphology and rapid solidification during thermal spraying. *International Journal of heat and mass transfer*, Elsevier, v. 44, n. 24, p. 4579–4592, 2001. Citado na página [14](#).
- ZIRARI, M.; EL-HADJ, A. A.; BACHA, N. Numerical analysis of partially molten splat during thermal spray process using the finite element method. *Applied Surface Science*, Elsevier, v. 256, n. 11, p. 3581–3585, 2010. Citado na página [14](#).
- ZU, J.; HUTCHINGS, I.; BURSTEIN, G. Design of a slurry erosion test rig. *Wear*, Elsevier, v. 140, n. 2, p. 331–344, 1990. Citado 2 vezes nas páginas [26](#) e [37](#).

APÊNDICE A – DESIGN DO PROTÓTIPO DO EQUIPAMENTO USADO DURANTE O ENSAIO DE DESGASTE EROSIVO POR LAMA

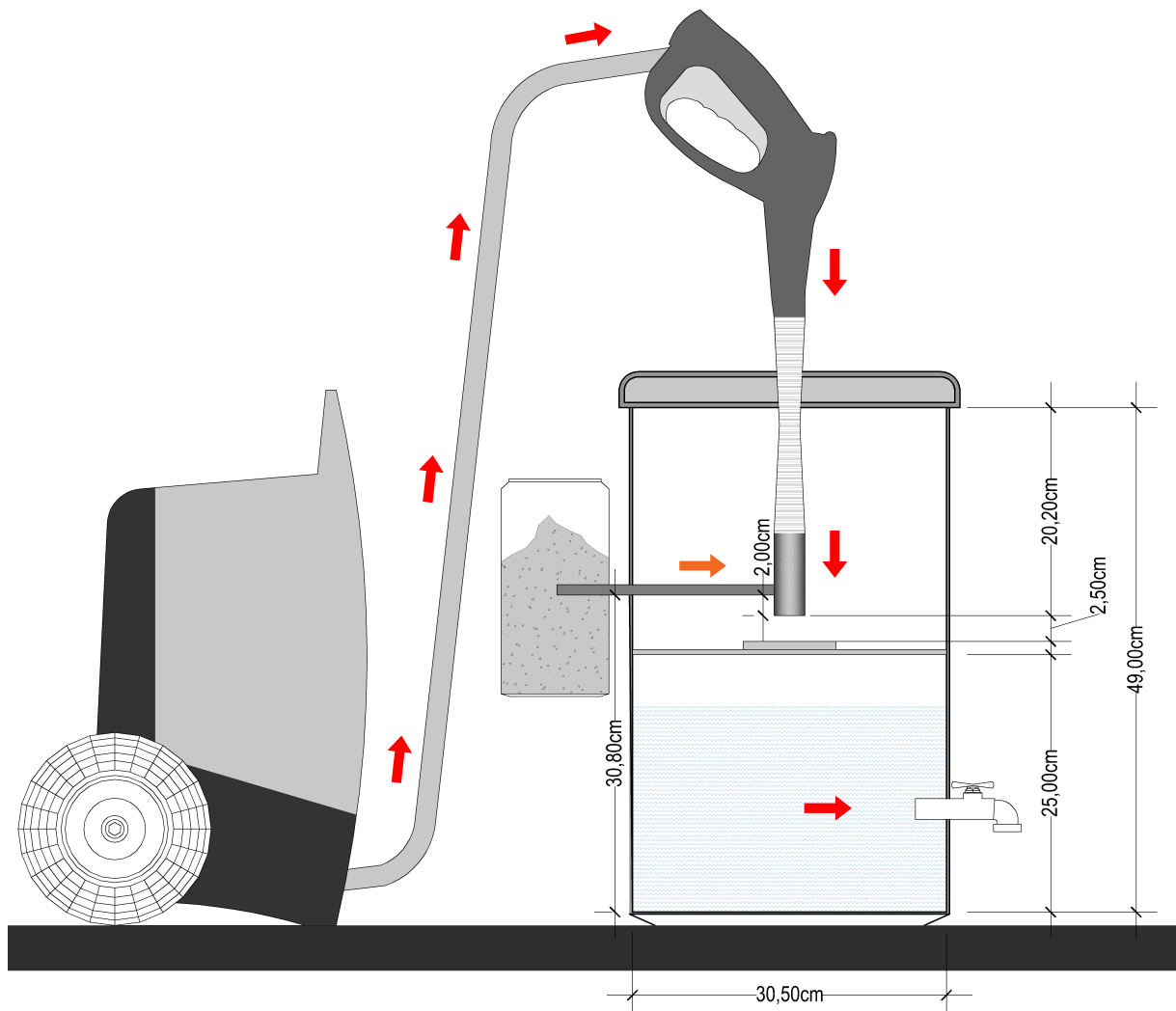


Figura A.1 – Design do protótipo do equipamento usado durante o ensaio de desgaste erosivo por lama.

APÊNDICE B – DESIGN DAS PEÇAS DO ACESSÓRIO ADAPTADO NO BICO DA PISTOLA, COM O DISPOSITIVO VENTURI-ACELERADOR DE PARTÍCULAS, USADO DURANTE O ENSAIO DE DESGASTE EROSIVO POR LAMA

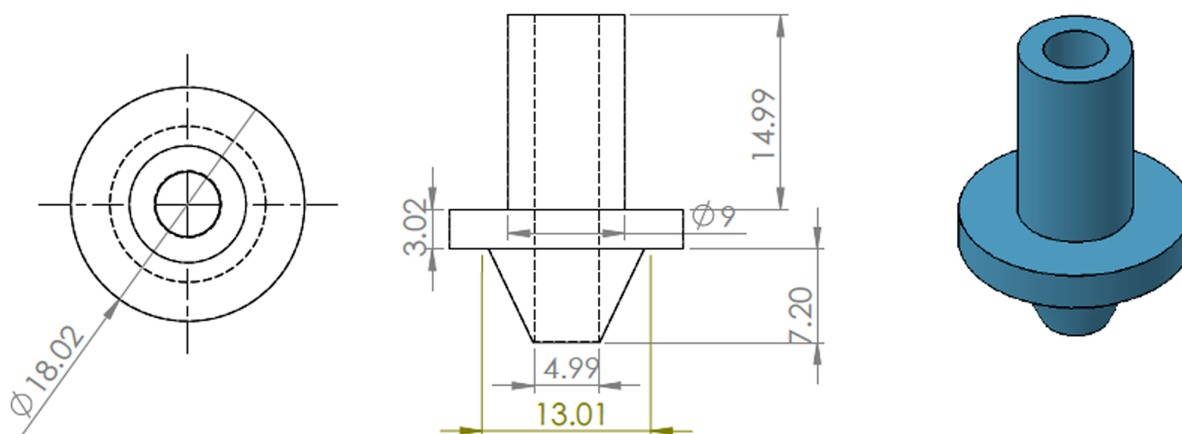


Figura B.1 – Peça macho do injetor com as dimensões em mm, acessório adaptado no bico da pistola, com o dispositivo Venturi-acelerador de partículas. Visualização 3D feita com o programa Solidworks 2017.

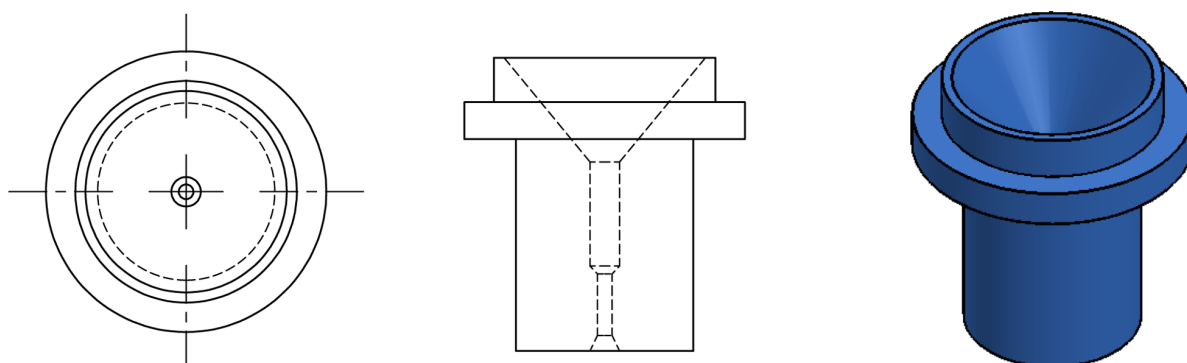


Figura B.2 – Peça fêmea do injetor, acessório adaptado no bico da pistola, com o dispositivo Venturi-acelerador de partículas. Visualização 3D feita com o programa Solidworks 2017.

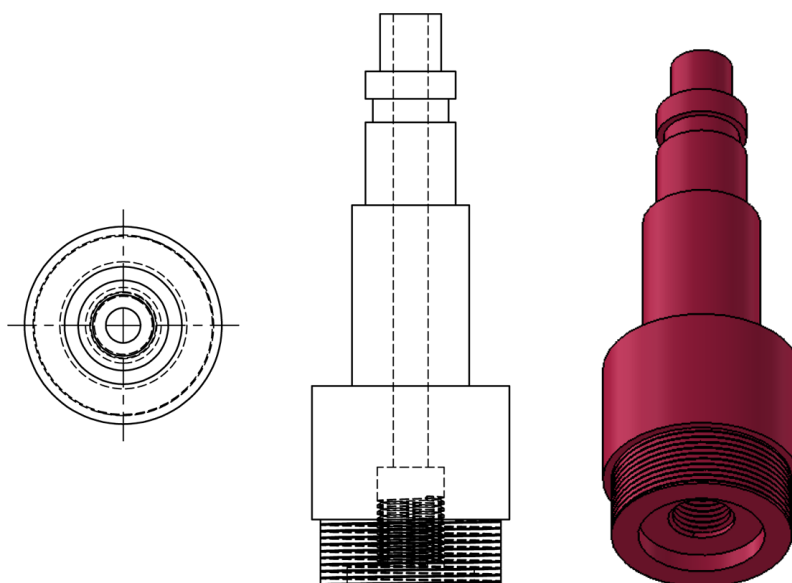


Figura B.3 – Base do injetor, acessório adaptado no bico da pistola, com o dispositivo Venturi-acelerador de partículas. Visualização 3D feita com o programa Solidworks 2017.

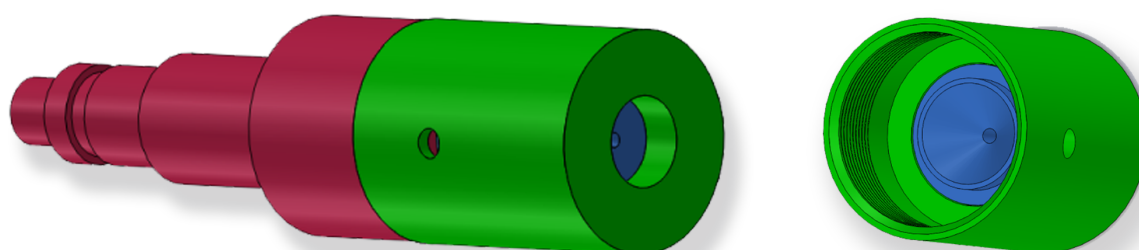


Figura B.4 – Acessório adaptado no bico da pistola, com o sistema de alimentação de partículas erodentes, utilizando no interior um dispositivo Venturi-acelerador das partículas. Visualização 3D feita com o programa Solidworks 2017.

APÊNDICE C – TAXA EROSÃO VOLUMÉTRICA, EM FUNÇÃO ÂNGULO DE ATAQUE, DO AÇO INOX MARTENSÍTICO AISI 410, CARBETO DE TUNGSTÊNIO 86WC-10CO4CR E ELASTÔMERO PUR METALINE 785

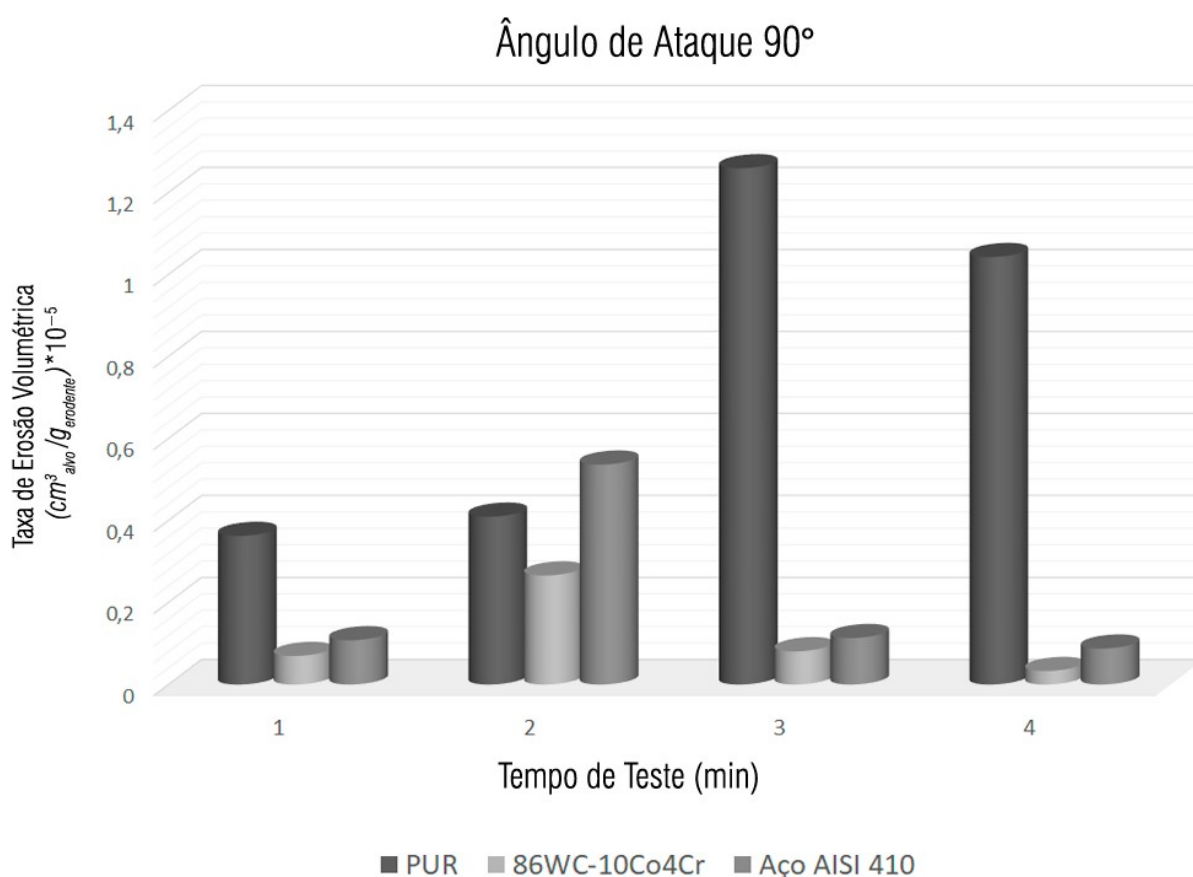


Figura C.1 – Variação da taxa de erosão volumétrica, em função do ângulo de ataque de 90°, para os materiais, aço Inox martensítico AISI 410, carbeto de Tungstênio 86WC-10Co4Cr e o elastômero PUR comercial MetaLine 785.

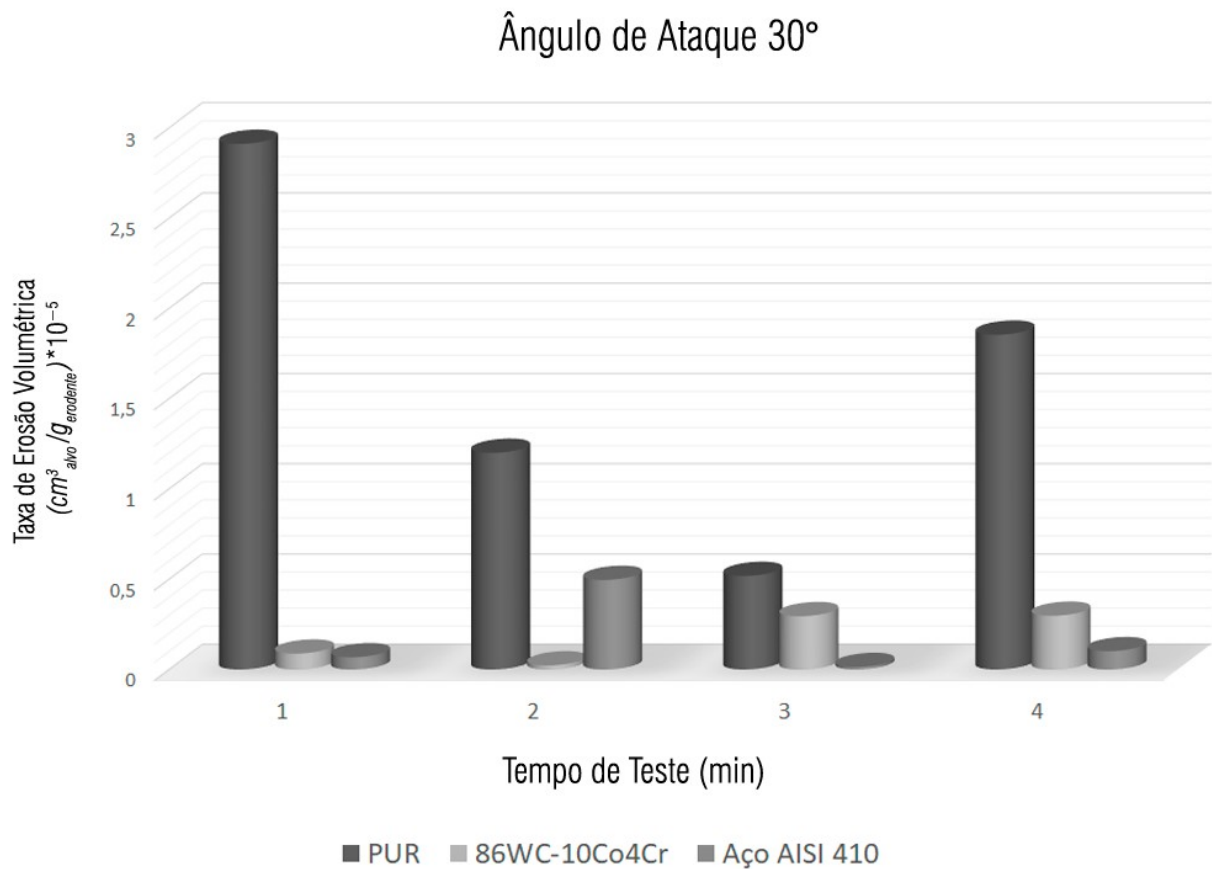


Figura C.2 – Variação da taxa de erosão volumétrica, em função do ângulo de ataque de 30°, para os materiais, aço Inox martensítico AISI 410, carbeto de Tungstênio 86WC-10Co4Cr e o elastômero PUR comercial MetaLine 785.